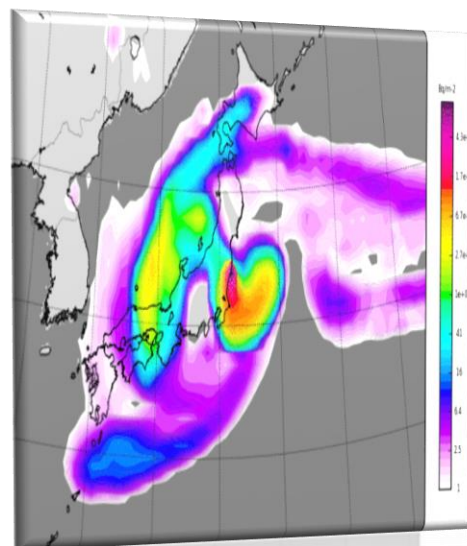
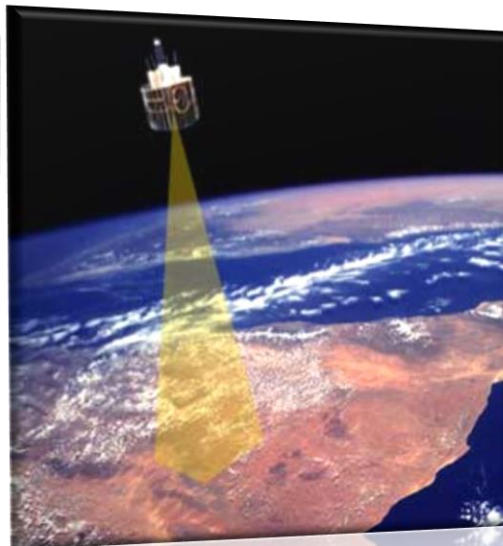


IMPLEMENTACIÓN METODOLÓGICA PARA  
ESTIMAR LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL  
PARTICULADO PM10 EN ZONAS DE CULTIVO DE  
CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA, A  
TRAVÉS DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN.



**IMPLEMENTACIÓN METODOLÓGICA PARA ESTIMAR LAS  
CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM10 EN ZONAS  
DE CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA, A  
TRAVÉS DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN.**

**JONNATHAN CÉSPEDES ROJAS  
JAIME ANDRÉS CUERO DUQUE**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA  
INGENIERIA TOPOGRAFICA  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**IMPLEMENTACIÓN METODOLÓGICA PARA ESTIMAR LAS  
CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM10 EN ZONAS  
DE CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA, A  
TRAVÉS DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el  
título de ingeniero topográfico**

**JONNATHAN CÉSPEDES ROJAS  
JAIME ANDRÉS CUERO DUQUE**

**DIRECTOR DE PROYECTO:  
FRANCISCO LUIS HERNANDEZ Msc.**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA  
INGENIERIA TOPOGRAFICA  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**Nota de Aceptación:**

---

---

---

---

**FRANCISCO LUIS HERNANDEZ**  
**Director de Proyecto**

---

**PABLO SARRICOLEA**  
**Jurado**

---

**MARTÍN BAYALA**  
**Jurado**

**Santiago de Cali, 03 de Febrero del 2015**



## **DEDICATORIA**

Este Trabajo de Grado está dedicado:

A las personas que creen en la ciencia como el camino más indicado para aportar a la construcción del equilibrio entre las tradiciones humanas y la estabilidad del medio ambiente,

A las personas que no necesitan levantar su voz para levantar sus ideas.

## **AGRADECIMIENTOS**

### ***Agradecimientos – Jonnathan Céspedes Rojas:***

Agradezco...

A mi Mamá, Olga Rojas Martínez, por cada mañana en la que despertó con la preocupación del porvenir de mi día, porque cada paso que ha dado ha sido encaminado a que tengamos la oportunidad de vivir nuestros sueños, por todas las carteleras que hicimos juntos, por todos los abrazos y lágrimas de felicidad que me han abrigado con el más dulce amor.

A mi Papá, Luis Fernando Céspedes, por dejar su vida entera dispuesta a que seamos personas no que cambiemos el mundo, sino que construyamos el nuestro, por cada gota de sudor que has derramado para hacer posible esto que hoy es una grandiosa realidad, incluso por tu bienestar que has dejado en segundo plano por el nuestro.

A mi Hermanito, Yonni Céspedes Rojas, por las risas, los juegos, la complicidad, el silencio, la nada, los berrinches, los golpes, la ternura, la preocupación, el ejemplo, la vida misma; gracias porque siempre quiero ser alguien que te inspire y eso ha alimentado mi espíritu, gracias por ser el hermano que cualquiera desearía y yo tuve la fortuna de tenerte y verte crecer día a día.

Finalmente a: Anamaría, Diego Fernando, Eliecer, Luis Eduardo, Juan Felipe, Mario, Jonathan, Tatiana, y por supuesto a Jaime Andrés que más que mi amigo ha sido el hermano mayor que nunca tuve; porque gracias a ustedes la Universidad no sólo fue un lugar donde recibí instrucción académica, fue un hogar donde los elegí como mi segunda familia, me enseñaron lo que significa la amistad, me presentaron con el amor, con ustedes aprendí que vida es un recipiente vacío que toma la forma de los sentimientos.

### ***Agradecimientos – Jaime Andrés Cuero Duque:***

Agradezco...

A mi padre Jaime Cuero Urritia por enseñarme a ver siempre el lado positivo de las cosas, por dedicar su vida a mi formación y crecimiento, por ser un padre ejemplar en todo el sentido de la palabra, también le agradezco el enseñarme el significado de la humildad, el respeto y dedicación, algo sin lo que este resultado hubiese sido imposible.

A mi madre y maestra Luz Dary Duque Lenis por educarme en todos los aspectos importantes de mi vida, por enseñarme a ser un hombre perseverante y creyente de si mismo, por enseñarme que las metas y propósitos son las que nos mueven, le agradezco por haber sido mi más grande formadora tanto en este como en todas las etapas de mi vida, con palabras nunca fuera de lugar y siempre acertadas llevándome a culminar este proceso con éxito.

A mi hermano Juan David Cuero por su alegría y acompañamiento en aquellos momentos de dificultad, por hacerme su ejemplo como hermano mayor, por motivar mis días siempre con una gran sonrisa y también por ser el principal partícipe y creador del valor de la responsabilidad en mi como académico y ser humano.

A mi abuela Ana Cecilia Lenis por su amor constante, por enseñarme el significado de la fortaleza con tan solo compartirme sus experiencias, por sentirse orgullosa de mi por cosas pequeñas y así motivarme a ser alguien grande.

A mis compañeros y colegas que me acompañaron en la formación como profesional y humano, momentos inolvidables que dejaron en mi un enorme sentimiento de pertenencia y complicidad, agradezco estas tardes interminables del “hueco”, donde no solo aprendí el valor de la amistad, si no a ser una persona integral con charlas influenciadas por diferentes disciplinas, que concluyeron en el fortalecimiento de la mía.

Y por último a mi amigo, hermano y compañero de tesis Jonnathan Céspedes Rojas, y quien solo puedo agradecer por su tiempo, por sus grandes esfuerzos y sabiduría, a quien le auguro una excelente vida académica y profesional.

### ***Agradecimientos Generales:***

Quisiéramos expresar conjuntamente nuestros agradecimientos:

A la Universidad del Valle por darnos la oportunidad de formarnos como humanos y profesionales con una visión amplia del mundo, capacitados para aportar al mejoramiento de nuestro sector académico y laboral.

Al programa de Ingeniería Topográfica de la facultad de Ingeniería, por el continuo acompañamiento y fortalecimiento de nuestra formación como ingenieros con un enfoque académico dirigido a poner nuestros conocimientos al servicio de la comunidad y el medio ambiente.

Al plantel de profesores que participaron de nuestra formación, especialmente al profesor Francisco Luis Hernández por asesorar y guiar este trabajo de grado que ha culminado con éxito.

A la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC-, por proporcionar información requerida para la realización de este proyecto, tales como las mediciones de la red de calidad de aire del Valle del Cauca. Especialmente a German Restrepo y Leonardo Aponte quienes desde el principio creyeron en este proyecto y lo demostraron a través de su tiempo y conocimiento.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>4</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>6</b>
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>6</b>
<b>3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>6</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>7</b>
<b>5. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>9</b>
<b>5.1. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>9</b>
5.1.1. Teledetección Espacial	9
5.1.2. Imágenes Multiespectrales	9
5.1.3. ESPECTRÓMETRO DE IMAGEN DE RESOLUCIÓN MODERADA (MODIS)	10
5.1.4. Contaminación Atmosférica	11
5.1.5. Material Particulado en Suspensión	12
5.1.6. Partículas en Estado Sólido	13
5.1.7. Material Particulado (PM <sub>10</sub> )	13
5.1.8. Propiedades Ópticas de los Aerosoles	14
5.1.9. Espesor Óptico de los Aerosoles (AEROSOL OPTICAL THICKNES)	15
5.1.10. Quema de Biomasa	15
5.1.11. PYTHON	15
5.1.12. AIRVIRO	15
<b>5.2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>16</b>
5.2.1. Reflectancia Superficial	17
5.2.2. Propiedades Ópticas de los Aerosoles	21
5.2.3. Algoritmo Multiespectral de PM <sub>10</sub>	23
<b>5.3. MARCO REFERENCIAL</b>	<b>24</b>

5.3.1.	Panorama Mundial .....	24
5.3.2.	Panorama Local: América Latina y el Caribe.....	33
<b>6.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>
6.1.	MATERIALES.....	37
6.1.1.	Zona de Estudio .....	38
6.1.2.	Obtención de la Información.....	38
6.2.	PRE-PROCESAMIENTO .....	41
6.2.1.	Georreferenciación.....	41
6.2.2.	Corrección Radiométrica .....	41
6.2.3.	Corrección de Efectos Atmosféricos.....	41
6.2.4.	Recorte de la Zona de Estudio.....	42
6.3.	PROCESAMIENTO .....	43
6.3.1.	Reflectancia de Superficie .....	43
6.3.1.1.	Cálculo del Ángulo de Dispersión de la Luz .....	43
6.3.1.2.	Cálculo de la Función Fase de Dispersión.....	43
6.3.1.3.	CÁLCULO DE LA REFLECTANCIA SUPERFICIAL .....	44
6.3.2.	Espesor Óptico de Aerosoles.....	45
6.3.2.1.	Cálculo del Albedo de Dispersión Simple ( $\omega_0$ ).....	45
6.3.2.2.	Cálculo de la Reflectividad Aparente.....	46
6.3.2.3.	Cálculo del Espesor Óptico de Aerosoles (AOT) .....	46
6.3.3.	Calculo de PM10 .....	46
6.3.3.1.	Cálculo de la Dispersión de MIE .....	48
6.3.3.2.	Corrección del Camino de la Energía Irradiada por los Aerosoles.....	48
6.3.3.3.	Cálculo de los Coeficientes Empíricos y PM10 .....	48
6.4.	VALIDACIÓN.....	49
6.5.	Modelación de Quemas de Caña Mediante la AIRVIRO.....	54
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
7.1.	ÁNGULOS DE DISPERSIÓN DE LA LUZ Y LA FUNCIÓN FASE DE DISPERSIÓN.....	57

7.2.	REFLECTANCIA SUPERFICIAL.....	60
7.3.	ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES (AOT) .....	62
7.4.	CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM10) .....	68
7.5.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	70
7.6.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN EN <i>AIRVIRO</i> .....	78
<b>8.</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>88</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>10.</b>	<b>RECOMENDACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>95</b>



## TABLA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ubicación de estaciones de monitoreo .....	5
<b>Tabla 2.</b> Características de las bandas espectrales del sensor MODIS .....	10
<b>Tabla 3.</b> Longitudes de onda en el espectro electromagnético del sensor Landsat 7 ETM+ .....	32
<b>Tabla 4.</b> Relación cronológica de imágenes descargadas. ....	40
<b>Tabla 5.</b> Escalas de Monitoreo del SVCA .....	52
<b>Tabla 6.</b> Ubicación geográfica de las estaciones de la red de calidad de aire del Valle del Cauca .....	53
<b>Tabla 7.</b> Información de quema de caña para el 2011 .....	56
<b>Tabla 8.</b> Información de condiciones para quema de caña para el 2011 .....	56
<b>Tabla 9.</b> Resultados preliminares para valores de AOT del año 2011 .....	57
<b>Tabla 10.</b> Resultados preliminares para valores de AOT del año 2012. ....	58
<b>Tabla 11.</b> Parámetros del sensor para el cálculo del ángulo de observación .....	59
<b>Tabla 12.</b> Resultados preliminares para la reflectancia superficial.....	61
<b>Tabla 13.</b> Resultados de AOT incluyendo píxeles con nubosidad para el año 2011 .....	62
<b>Tabla 14.</b> Resultados de AOT excluyendo píxeles con nubosidad para el año 2011 .....	64
<b>Tabla 15.</b> Condiciones de servicio de la red de calidad de aire. ....	71
<b>Tabla 16.</b> Productos obtenidos de regresiones lineales para el año 2011. ....	72
<b>Tabla 17.</b> Productos obtenidos de regresiones lineales para el año 2012 .....	74
<b>Tabla 18.</b> Datos AIRVIRO y MODIS de Enero 11 del 2011.....	80

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema operativo para la obtención de una imagen satelital .....	9
<b>Figura 2.</b> Distribución típica de las partículas en la atmosfera.....	13
<b>Figura 3.</b> Comparación de partículas finas con un cabello humano.....	14
<b>Figura 4.</b> Modelo de dispersión Gaussiano .....	16
<b>Figura 5.</b> Angulo de barrido del sensor .....	18
<b>Figura 6.</b> Distribución espacial de PM10 medido en 47 lugares. (a), MODIS AOD (b), MODIS Angstrom (c), MODIS Fracción de partículas finas (d).....	27
<b>Figura 7.</b> Comparación de datos MODIS con datos PM10 para determinar el impacto de la "Neblina" sobre la calidad de aire, periodo de 22 de Junio al 23 de Agosto del 2005...	31
<b>Figura 8.</b> Esquema metodológico.....	37
<b>Figura 9.</b> Ubicación de zonas de cultivo de caña y estaciones de calidad de aire. ....	39
<b>Figura 10.</b> Código fuente del proceso "ExtracByMask" para recorte de raster.....	42
<b>Figura 11.</b> Esquema Metodológico para la obtención de la Reflectancia Superficial .....	44
<b>Figura 12.</b> Esquema Metodológico para la obtención de AOT.....	47
<b>Figura 13.</b> Esquema Metodológico para la obtención de PM10.....	50
<b>Figura 14.</b> Regresión lineal simple entre límite permisible de PM10 y la reflectividad atmosférica de $\lambda_1 = 660\text{nm}$ para el día 02 de Enero del 2011. ....	49
<b>Figura 15.</b> Distribución geográfica de las estaciones de calidad de aire con sus respectivas zonas de influencia con Radio de 20Km, caso de estudio.....	51
<b>Figura 16.</b> Esquema Metodológico para la validación de PM10 .....	52
<b>Figura 17.</b> Modelos de dispersión - Airviro .....	54
<b>Figura 18.</b> Esquema Metodológico del proceso Airviro.....	55
<b>Figura 19.</b> Tendencias de absorción y dispersión para la zona de estudio en años 2011 y 2012 .....	59
<b>Figura 20.</b> Bandas 11 y 14 del producto MOD02.....	60
<b>Figura 21.</b> Promedio de AOT con y sin presencia de nubosidad para el año 2011.....	65
<b>Figura 22.</b> Homogeneidad de valores en pixeles con nubosidad.....	65
<b>Figura 23.</b> Promedio de AOT con y sin presencia de nubosidad para el año 2012.....	66
<b>Figura 24.</b> Promedios de AOT para periodos de 2011 y 2012.....	67
<b>Figura 25.</b> Coberturas de nubosidad por banda (Canal) utilizada.....	68
<b>Figura 26.</b> Promedios diarios de PM10 para el año 2011 obtenidos con imágenes MODIS .....	69
<b>Figura 27.</b> Promedios diarios de PM10 para el año 2012 obtenidos con imágenes MODIS .....	70
<b>Figura 28.</b> Regresiones lineales de validación para el mes de enero del año 2011.....	73
<b>Figura 29.</b> Relación de la dinámica del PM10 de Enero a Mayo en los años 2011 y 2012 con respecto a los periodos de variabilidad climática de la zona de estudio. ....	76
<b>Figura 30.</b> Relación de la dinámica del PM10 de Enero a Mayo en los años 2011 y 2012 con respecto a la normatividad de calidad de aire .....	77
<b>Figura 31.</b> Dispersión de tasa de emisión de quema de caña generada en AIRVIRO .....	78
<b>Figura 32.</b> Dispersión de quema de AIRVIRO en formato raster .....	79

<b>Figura 33.</b> Perfil comparativo para Enero 11 del 2011 .....	81
<b>Figura 34.</b> Perfil comparativo para Enero 27 del 2011 .....	82
<b>Figura 35.</b> Perfiles comparativos para Febrero del 2011, a) febrero 20 del 2011; b) febrero 28 del 2011 .....	83
<b>Figura 36.</b> Perfiles comparativos para Marzo del 2011, a) Marzo 11 del 2011; b) Marzo 15 del 2011 .....	84
<b>Figura 37.</b> Perfiles comparativos para Abril del 2011, a) Abril 01 del 2011; b) Abril 14 del 2011; c) Abril 21 del 2011; d) Abril 26 del 2011 .....	85
<b>Figura 38.</b> Perfiles comparativos para Mayo del 2011, a) Mayo 23 del 2011; b) Mayo 30 del 2011 .....	87

## **TABLA DE ANEXOS**

<b>Anexo A.</b> Macro en Código fuente Excel “Visual BASIC” .....	<b>104</b>
<b>Anexo B.</b> Regresiones Lineales para Coeficientes Empíricos.....	<b>104</b>
<b>Anexo C.</b> Cartografía de PM10 años 2011 y 2012.....	<b>108</b>
<b>Anexo D.</b> Cartografías de los modelos dispersión en AIRVIRO.....	<b>121</b>

## **LISTA DE TERMINOS**

**MODIS:** Espectrómetro de Imagen de Resolución Moderada

**TOA:** Parte Alta de la Atmósfera

**AOD:** Profundidad Óptica de Aerosoles

**AOT:** Espesor Óptico de Aerosoles

**PM<sub>10</sub>:** Material Particulado de 10µm de diámetro

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura

**CVC:** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca

## RESUMEN

La contaminación atmosférica es un problema que ha tomado un rol protagónico dentro de la representación de costos ambientales y sociales en Colombia y el mundo. Algunas prácticas agrícolas que se llevan a cabo en el departamento del Valle del Cauca, como la quema de biomasa, son presuntamente causantes de una alta tasa de emisiones nocivas a la atmosfera dando lugar al origen de enfermedades respiratorias a las personas que habitan poblaciones cercanas a este tipo de eventos, por ello, surgió la necesidad de medir la calidad de aire en esta zona a través de una red de estaciones compuestas por gravímetros, sin embargo, debido a algunos daños de las estaciones y datos medidos mediante interpolaciones no se realiza un monitoreo constante y espacialmente adecuado de este fenómeno sobre dicha zona. Por consiguiente, esta investigación plantea la propuesta del uso de sensores remotos como apoyo a las redes de estaciones en el propósito de monitorear la calidad de aire, en este caso de estudio medir concentraciones de PM10, y estimar la influencia de la quema de biomasa, específicamente Caña de Azúcar, sobre las concentraciones totales de PM10. A través del uso de datos MOD02 del sensor MODIS, los cuales fueron procesados en su totalidad mediante Scripts desarrollados en formato Python, se ha aplicado un algoritmo multispectral que relaciona los límites permisibles de emisión de este contaminante con imágenes de reflectividad atmosférica que produce este material particulado, generadas a partir del uso de las teorías de dispersión de MIE y de Rayleigh. De dicha relación se obtienen imágenes con las que se generan series de tiempo que muestran el comportamiento de la concentración total de PM10 sobre la zona de estudio, las cuales son comparadas con los datos de las estaciones de la red de calidad de aire por medio de regresiones lineales simples que permiten observar si los datos calculados coinciden con los datos medidos, obteniendo que aproximadamente un 80% de los datos generados coinciden con la realidad. Posteriormente, dichas imágenes son analizadas con respecto a la tasa de emisión que genera cada evento de quema de caña, estas emisiones son modeladas a través de modelos Gaussianos que conforman la plataforma Airviro. De este análisis se obtienen perfiles de comparación entre tasa de emisión, concentración de PM10 en área afectada y concentración de PM10 en área no afectada. Así pues, se concluyó que los sensores remotos representan un método versátil y efectivo en el acompañamiento del monitoreo de la calidad de aire, no sólo en la zona de estudio de este proyecto, sino en cualquier zona deseada.

**Palabras Claves:** Sensores Remotos, MODIS, PM10, Aerosoles, Dispersión de MIE, Dispersión de Rayleigh, Modelos Gaussianos, Quema de Biomasa.



## 1. INTRODUCCIÓN

Según el Vice-ministerio de Medio Ambiente (2010), en el país, la contaminación atmosférica se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales; el deterioro de la calidad del aire ha propiciado que se incrementen los efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente. Las concentraciones de algunos contaminantes en la atmósfera, por encima de los estándares fijados en las normas ambientales, han generado la necesidad de continuar impulsando la gestión de la calidad del aire para proteger la salud de la población y el ambiente.

Cuando se habla de una **Emisión Atmosférica**, se dice que es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de éstos, proveniente de una fuente fija e inamovible o susceptible de desplazarse. (*Artículo 2°, Decreto 0948 de 05/06/1995*).

Para Colombia y específicamente para el Valle del Cauca, procesos como producción de materiales, crecimiento industrial, minería, y la quema de biomasa constituyen un aporte importante de las emisiones de Partículas Respirables (PM<sub>10</sub>) a la atmosfera, las cuales han generado en poblaciones aledañas afectaciones de salud. A razón de esto, se han adelantado proyectos a nivel regional, los cuales pretenden mitigar el impacto generado por este tipo de eventos; las herramientas que hacen esto posible, corresponden a mecanismos de medición y análisis de este tipo de Partículas emitidas.

En la actualidad, las técnicas de percepción remota brindan la posibilidad de suministrar datos mediante el análisis de las respuestas espectrales de cada tipo de superficie, permitiendo estudiar elementos presentes en el espacio que a simple vista son difíciles de detectar, acompañado de información a un mayor rango espacial.

La metodología de este trabajo se basa en la cuantificación de material particulado de tamaño igual a 10µm presente en el atmosfera utilizando técnicas de sensoramiento remoto, haciendo uso del producto MOD021KM del sensor TERRA MODIS, en el área comprendida por los municipios de Palmira, Pradera, La Unión, Cerrito, Buga, Candelaria y Zarzal, zona activa de cultivo de caña de azúcar en Valle del Cauca, con el objetivo de estimar las concentraciones de material particulado presentes en este lugar haciendo uso no solo de la información espectral extraída de la imágenes satelitales.

Los resultados obtenidos fueron validados por medio de una corrección lineal simple con datos de campo proporcionados por la red de estaciones de calidad del aire de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, ubicadas a lo largo del valle geográfico del Río Cauca.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia la contaminación atmosférica se ha constituido como una de la mayores problemáticas ambientales, ocupando el tercer lugar en representación de costos ambientales y sociales después de contaminación en el agua y los desastres naturales (Larsen, 2004), por esta razón, ha surgido la necesidad de implementar mecanismos para estimar la concentración de algunos contaminantes presentes en la atmosfera que en ocasiones sobrepasan los estándares permitidos por la normas ambientales incrementando los efectos negativos sobre la salud humana.

Según, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) en una encuesta realizada en el 2008, el 67% de los personas asumen la contaminación atmosférica como un problema ambiental y 52% consideran la contaminación atmosférica como el principal problema el cual afronta la población. Dentro de los elementos contaminantes de la atmosfera se encuentran Gases de Efecto Invernadero y las Partículas en Suspensión - PM<sub>10</sub>µm (µm: Micrómetros de diámetro)- causantes de enfermedades respiratorias. El tamaño de estas partículas PM 10µm, le permiten llegar más allá de la garganta, hasta el tracto respiratorio, siendo causante de enfermedades respiratorias; mientras que las partículas más finas de 2,5µm que no se incluirán en este trabajo, por su tamaño, pueden alojarse en los pulmones. (McCarty, 2011).

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) se caracteriza por ser una planta graminácea (pastos), que por sus cualidades biológicas tiene un alto índice fotosintético con respecto al promedio de la vegetación restante que oscila entre 150 y 200%. (Naturland, 2000). Es cultivada entre las latitudes 36.7° N y 31.0° S, desde el nivel del mar hasta altitudes de casi 1000 m, lo cual determina condiciones aptas para su cultivo y cosecha. Colombia cumple estas características climáticas y geográficas, el valle geográfico del río Cauca es la zona donde se concentra su producción, con una extensión de 200.000 hectáreas, la cual representa el 66% del área cultivada. Así mismo, la caña de azúcar representa el 54% del PIB agrícola, el 8% de PIB industrial y el 6% del PIB del Valle, el 5% de PIB industrial nacional y el 1.5% del PIB total nacional. (Asocaña, 1997).

La gran influencia de la cañicultura en Colombia se evidencia al existir cerca de 43 municipios ligados a esta agroindustria (33 municipios del Valle del Cauca, seis (6) municipios del departamento del Cauca y cuatro (4) de Risaralda) donde el impacto ambiental generado por quema de caña de azúcar, práctica que hace parte de la cosecha, ha originado problemas en la calidad del aire; tales como: humo, pavesas y cenizas (Fernández & Ruíz, 1998).

Sin embargo, los cañicultores y todas las organizaciones de la industria cañera, determinaron que las quemadas controladas contribuyen al aumento del volumen de corte y

así mismo a la productividad de los ingenios, además de facilitar el trabajo a los corteros, pues una de las características de la caña es que sus hojas y tallo están recubiertos por fibras rígidas que les causan lesiones corporales en el momento de la cosecha (Camargo Rojas, 2008).

La Infección Respiratoria Aguda (IRA), Asma y Bronquitis son de las enfermedades respiratorias más representativas, generalmente se le atribuye la responsabilidad de su aparición en las zonas urbanas a las PM 10 $\mu$ m. En la ciudad de Santiago de Cali se realizó un estudio de correlación matemática entre la concentración de PM 10 $\mu$ m y la prevalencia de estas enfermedades en diversos sectores del casco urbano del municipio, arrojando como resultado el porcentaje de prevalencia de las enfermedades según la zona estudiada, para el norte de la ciudad se presentó la cuota más alta con el 25%, pues su cercanía a la zona industrial de yumbo hace más propensos a estos habitantes de contraer estas enfermedades causadas por las PM 10 $\mu$ m (De la pava & Fernández, 2008)

Por esta razón, Colombia ha implementado acciones para el control de la contaminación del aire. En 1967 se instalaron las primeras redes para el monitoreo de la calidad del aire (Sánchez, 1994), en 1973 se expidió la Ley 23, bajo la premisa de “prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional”. Para el Valle del Cauca el procedimiento que se utiliza actualmente para el monitoreo de estas emisiones es el método gravimétrico, por muestreadores secuenciales, situados en estaciones de campo que la CVC –Corporación autónoma regional del Valle del Cauca- ha dispuesto en zonas estratégicas sobre los cultivos de caña con las coordenadas que indica la tabla 1 (CVC, 2011).

**Tabla 1.** Ubicación de estaciones de monitoreo

Nombre	Ubicación			
	Latitud	Longitud	Dirección	Altitud (msnm)
<b>Palmira</b>	3°32'15"N	76°18'03"W	SENA Cra 30 #40-25	965
<b>Acopi</b>	3°29'46.5"N	76°30'25.1"W	Cra. 36 No 15-150	950
<b>Buenaventura</b>	3°53'23.00"N	77° 4'8.30"W	Sociedad Portuaria	5
<b>Candelaria</b>	3°24'25,52"N	76°20'57,13"	Carrera 9 entre Calles 6y 7	978
<b>Candelaria Rural</b>	3° 26'23"N	76°18'20"W	Hacienda Balsora	950
<b>El Cerrito Rural</b>	3° 39'27"N	76°20'20"W	Hacienda Katanobu	950
<b>Tuluá Rural</b>	4° 01'24"N	76°16'03"W	Hacienda La Argelia	930
<b>Puerto Tejada</b>	3° 17' 27"	76° 26' 19"	Hacienda La Suiza	

**Fuente:** CVC, 2011

Pese a esto, según los resultados presentados por Álvarez (2007), evidencia que las estaciones presentaron fallas en más de 190 días de los 365 que tomó como periodo de prueba, lo que le imposibilitó tener una mayor precisión en los procedimientos aplicados para la determinación de su modelo de relación para concentración y respuesta médica.

Por lo mencionado anteriormente, se evidencia la importancia de utilizar herramientas para una continua y eficiente adquisición de datos en la totalidad de la zona afectada, ya que al ser las estaciones en campo una fuente vital para el procesamiento de los mismos, también son focos puntuales de acción, despreciando así, puntos del espacio igualmente importantes a la hora de obtener información; una metodología que resuelva este déficit de espacialidad y cobertura terrestre es la finalidad de este proyecto de investigación.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Implementar una metodología que permita estimar las concentraciones de material particulado (PM10) en zonas de cultivo de Caña de azúcar en el Valle del Cauca, a través de técnicas de sensoramiento remoto.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener el comportamiento del material particulado mediante modelos aplicados a imágenes satelitales.
- Modelar el comportamiento de material particulado proveniente de la quema de caña de azúcar, mediante el software AIRVIRO.
- Validar la metodología empleada para aplicarla en otras zonas con características topográficas y ambientales similares.
- Determinar las variaciones espaciales de las zonas con mayor presencia de emisión de partículas PM 10 $\mu$ m en zonas del cultivo de caña de azúcar.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo establece una metodología para cuantificación de Material Particulado de PM10, sobre cualquier zona comprendida por estaciones de calidad del aire, dejando la posibilidad de implementar sistemas de monitoreo constante de este material, ya que al hacer uso de imágenes satelitales y datos meteorológicos como Humedad Relativa (RH), Capa límite Atmosférica (ABL), Velocidad del viento y Dirección del viento, tanto el rango espacial como el temporal se ven influenciados de forma positiva, aumentando el rango de confiabilidad expresado en datos de correlación lineal.

Un monitoreo eficaz de material particulado PM10 sobre una zona se traduciría en ganancias de tipo social y económico recordando que la problemática atmosférica actual, es la que genera los mayores costos sociales y ambientales después de los generados por la contaminación del agua y los desastres naturales y en la gestión de la calidad del aire para proteger la salud de la población y el ambiente.

Este producto es útil como un insumo para el ordenamiento del territorio, también para determinar todas las zonas pobladas que presenten una mayor vulnerabilidad por influencias contaminantes, impulsando proyectos para la mitigación, compensación, además de ser un insumo importante para el diseño, evaluación y ajuste de políticas y estrategias de prevención que permitan regular la calidad de aire.

Partiendo del hecho de que la agroindustria de la caña de azúcar es una de las principales fuentes de desarrollo económico y social de la región Vallecaucana, se plantea la necesidad de estudiar los factores que giran en torno a esta, en este caso, se hará un énfasis especial en el factor ambiental, puesto que es uno de los aspectos más importantes y más cuestionados de esta fuente primaria de la economía.

La quema de la caña de azúcar representa un problema ambiental que tiene repercusiones en la salud humana, es por esto, que entidades como la CVC han establecido regulaciones que permitan monitorear las emisiones atmosféricas que resultan de estas quemas, incorporando estaciones base que midan la calidad del aire (CVC, 2011).

Las estaciones base se encargan de monitorear la concentración diaria de emisiones de PM10, ubicadas en lugares sensibles, estas estaciones son la fuente para la información posteriormente procesada, por esto es de vital importancia un continuo mantenimiento que garantice su funcionamiento óptimo.

Actualmente se cuenta con aproximadamente 8 estaciones que miden la calidad del aire en el Valle del Cauca. La ubicación de estas estaciones, es de carácter puntual, por lo que su fuerte es la captura de información en un radio de acción cercano, mientras que la

información distante es obtenida por métodos de interpolación que generalmente presenta errores en sus resultados (Aguado et al., 2000). La falta de espacialidad en las estaciones es la mayor ventaja de las imágenes satelitales. Sin embargo, estas estaciones poseen una gran ventaja sobre el procesamiento de imágenes y es que capturan información las 24 horas del día, mientras que con imágenes sólo se genera información una vez al día.

Quizás, el producto más importante que ofrece esta investigación, es resolver el problema de espacialidad que tienen las estaciones de monitoreo de calidad del aire. Mediante el procesamiento de imágenes se obtendrá la información que ofrecen las estaciones acerca de las emisiones de PM 10µm a un mayor rango de confiabilidad, pues la información es directamente proporcionada por la atmosfera, tendrá una cobertura espacial que monitoreará la zona de influencia directa e indirecta de las quemas de caña de azúcar, por lo que es un producto de gran utilidad, pues técnicamente, corresponde a una estación por pixel registrado de la zona de estudio.

Si bien, la información generada por las imágenes satelitales complementan a la temporalidad de las estaciones de monitoreo, existen software de Modelos de dispersión de Aire, los cuales generan datos de dispersión de emisiones. La CVC actualmente realiza proyectos que van de la mano con este tipo de herramientas, lo que proporciona un insumo de mayor calidad al concluir datos. La herramienta AirViro (SMHI, 2010), específicamente el módulo de dispersión (SMHI, 2009) permite hacer estimaciones del tipo “peor caso” de impactos en la calidad del aire, originados por contaminantes de fuente única, con variables como: velocidad del viento, dirección del viento, área presencia del fenómeno, y concentración de partículas, es aquí donde la información generada a través de este proyecto de investigación puede propiciar un panorama más claro a la hora de evaluar la calidad del aire.

Por otra parte, un resultado de resolver este problema de espacialidad y brindar información in situ, es generar cartografía temática, donde se determinaran todas las zonas que tienen un mayor presencia de emisiones dentro de los cultivos de caña de azúcar, este producto es útil como un insumo para el ordenamiento del territorio, también para determinar todas las zonas pobladas que presenten una mayor vulnerabilidad por efectos de la quema de la caña de azúcar, lo que dará lugar a que los entes encargados de tomar decisiones para la mitigación, compensación y contingencia no desprecien las incidencias sociales y económicas que a esta problemática preceden, además de ser un insumo importante para el diseño, evaluación y ajuste de políticas y estrategias de prevención y control que permitan regular la calidad de aire y a su vez velar por la sociedad.



## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. MARCO CONCEPTUAL

#### 5.1.1. Teledetección Espacial

La *Teledetección Espacial* es una técnica que se basa en principios de percepción remota la cual permite obtener información de cualquier objeto sin tener contacto directo, la información se obtiene a través de sensores instalados en plataformas satelitales que perciben la energía luminosa emitida por el sol que reflejan todas las coberturas del planeta, una vez el sensor captura la cantidad de radiación electromagnética transmite esta información a estaciones receptoras en tierra así como lo muestra la Figura 1, esta información es codificada a niveles digitales que representan tonos de grises dando lugar a la creación de una imagen similar a una fotografía.

Las imágenes satelitales se diferencian de las fotografías aéreas debido a que los sensores ubicados en los satélites contienen receptores que interactúan con diversas longitudes de onda del espectro electromagnético, obteniendo de esta manera información de diversas regiones del espectro electromagnético. Las tecnologías aplicadas a los sensores permiten que estos interactúen con más regiones del espectro, en el contexto de las imágenes satelitales estas longitudes de ondas capturadas son llamadas bandas espectrales, por esta razón existen imágenes Multiespectrales e Hiperespectrales (Muñoz, 2005).

**Figura 1.** Esquema operativo para la obtención de una imagen satelital



**Fuente:** Muñoz, 2005.

#### 5.1.2. Imágenes Multiespectrales

Las *Imágenes Multiespectrales* se caracterizan por representar mediciones de diversas regiones del espectro electromagnético, los sensores instalados en las plataformas satelitales poseen detectores que miden la energía en diversas longitudes de onda que incluso pueden pertenecer a una misma región espectral. En la teledetección espacial, las

regiones del espectro que suelen ser captadas con mayor frecuencia por los sensores son el óptico y el infrarrojo, generalmente los sensores multiespectrales suelen hacer mediciones a decenas de longitudes de onda.

### 5.1.3. ESPECTRÓMETRO DE IMAGEN DE RESOLUCIÓN MODERADA (MODIS)

Es un sensor de observación de la tierra que se encuentra a una altura de 705 km, posee una órbita polar que proporciona una cobertura global cada 2 días ya que consta de dos partes diferentes que escanean una franja de gran longitud terrestre. MODIS proporciona imágenes en 36 bandas espectrales (entre 0,415 y 14,235), de las cuales 2 bandas poseen resolución espacial de 250m (bandas 1-2), 5 bandas con resolución de 500m (bandas 3-7) y las 29 restantes (bandas 8-36) a 1000m de resolución. Estas imágenes son utilizadas para procesos de la tierra, el océano y la atmosfera, por consiguiente, la tabla 2 presenta algunas de las principales aplicaciones y características de las bandas espectrales del sensor. (King, Kaufman, Menzel, & Tanré, 1992).

**Tabla 2.** Características de las bandas espectrales del sensor MODIS

Principales Usos	Banda	Longitud de Onda <sup>1</sup>	Radiancia Espectral <sup>2</sup>	SNR <sup>3</sup> o NE (delta) T requerido T(K) <sup>4</sup>
<b>Límite de Tierra/Nubes/Aerosoles</b>	1	620 - 670	21,8	128
	2	841 - 876	24,7	201
<b>Propiedades de Tierra/Nubes/Aerosoles</b>	3	459 - 479	35,3	243
	4	545 - 565	29	228
	5	1230 - 1250	5,4	74
	6	1628 - 1652	7,3	275
	7	2105 - 2155	1	110
	8	405 - 420	44,9	880
<b>Color del océano/Fitoplancton/Biogeoquímica</b>	9	438 - 448	41,9	838
	10	483 - 493	32,1	802
	11	526 - 536	27,9	754
	12	546 - 556	21	750
	13	662 - 672	9,5	910
	14	673 - 683	8,7	1087
	15	743 - 753	10,2	586

	16	862 - 877	6,2	516
<b>Vapor de agua atmosférico</b>	17	890 - 920	10	167
	18	931 - 941	3,6	57
	19	915 - 965	15	250
<b>Temperatura de Superficie/Nubes</b>	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0,05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0,07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0,07
<b>Temperatura atmosférica</b>	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0,25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0,25
<b>Vapor de agua de nubes Cirrus</b>	26	1.360 - 1.390	6	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0,25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0,25
<b>Propiedades de las nubes</b>	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0,05
<b>Ozono</b>	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0,25
<b>Temperatura de Superficie/Nubes</b>	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0,05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0,05
<b>Altitud de las nubes</b>	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0,25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0,25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0,25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0,35

Fuente: NASA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bandas de 1 a 19 en unidades de nm; Bandas de 20 a 36 en  $\mu\text{m}$ .

<sup>2</sup> Valores de Radiancia espectral en  $\text{W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ .

<sup>3</sup>SNR: Radio de Señal-Ruido.

<sup>4</sup>NE (Delta) T requerido: Diferencia de temperatura equivalente al ruido.

#### 5.1.4. Contaminación Atmosférica

Desde los orígenes, el equilibrio del aire se ha perturbado por factores como erupciones volcánicas, incendios forestales y demás fenómenos naturales. Con el continuo desarrollo de los seres humanos los registros de perturbación del equilibrio del aire han incrementado.

<sup>1</sup> <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

Entonces se puede explicar la contaminación atmosférica como la perturbación producida por acciones naturales o antropogénicas al equilibrio en la composición del aire.

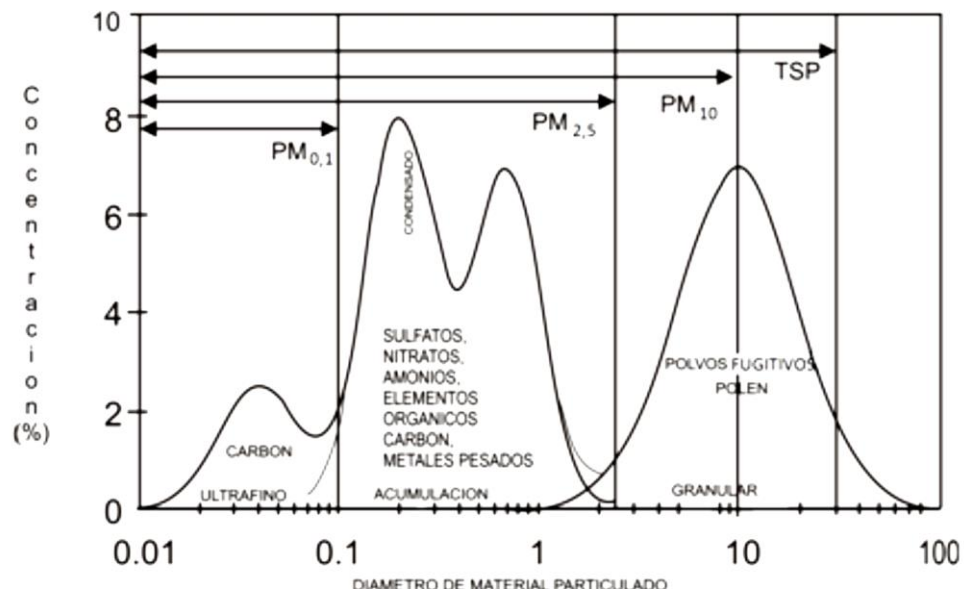
Actualmente no existe una definición globalizada de contaminación atmosférica, sin embargo, partiendo del concepto planteado de composición del aire, es necesario decir que la contaminación atmosférica es el producto de cualquier circunstancia que tiene como resultado el incremento o decremento en la tasa de proporción normal de cada componente del aire, provocando alteraciones en sus características químicas y físicas de manera que pueda ser detectado por los componentes del medio. Lo habitual es considerar como contaminantes sólo las sustancias que han sido añadidas en cantidades suficientes como para producir un efecto medible en las personas, animales, vegetales o los materiales; Otra definición de contaminación atmosférica, es aquella en la que ciertas sustancias adquieren concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal como para producir un efecto mensurable en el hombre, los animales, la vegetación o los materiales. En conclusión, la contaminación atmosférica es la alteración de la composición normal del aire que tiene efectos negativos en los seres vivos y los elementos materiales (Fernández & García, 2009).

#### **5.1.5. Material Particulado en Suspensión**

El *Material Particulado en Suspensión* es un tipo de contaminante atmosférico que puede encontrarse disperso en estado sólido o líquido que tiene procedencia natural (Ej. erupciones volcánicas, terremotos, lluvias entre otros) o antropogénica (Ej. Combustión fósil, quema de biomasa).

El concepto de material particulado no hace referencia a un único componente, por el contrario, este contaminante es una mezcla heterogénea de materiales de diversa naturaleza y procedencia que posee un amplio rango de características químicas, físicas y termodinámicas, es por esta razón que la única manera de clasificar el material particulado, y a su vez los efectos que este tiene sobre las condiciones normales del medio ambiente, es a partir de su tamaño. Existen dos clases generales para clasificar el material particulado, las partículas gruesas que tienen un diámetro superior a 10  $\mu\text{m}$  y las partículas finas que tienen un diámetro inferior a 10  $\mu\text{m}$  (Arciniégas, 2012), sin embargo, en la Figura 2 se presenta que existe relación entre el tipo de material y el tamaño de las partículas. (Watson & Chow, 2000). Las partículas finas son un importante foco de estudio en el panorama ambiental y médico, pues su diámetro aerodinámico permite que sean respiradas invadiendo el tracto respiratorio. La exposición continua a ambientes con altos niveles de material particulado incrementa el riesgo de sufrir enfermedades respiratorias, donde una de las poblaciones más propensas a enfermedades son los niños (Cuao, Álvarez, & Vargas, 2012).

**Figura 2.** Distribución típica de las partículas en la atmosfera



**Fuente:** Watson & Chow, 2000.

#### 5.1.6. Partículas en Estado Sólido

Las *Partículas en Estado Sólido* a nivel rural tienen procedencia mineral y orgánica, esto se debe a la descomposición de biomasa o materia producida por animales y a la erosión eólica que sufren los grandes cuerpos rocosos y los suelos.

En un entorno urbano una de las principales causas de emisión de partículas en estado sólido es la combustión incompleta producida por la quema de combustibles fósiles y la combustión interna de los vehículos, con base en esto se afirma que las partículas de carbono juegan un papel importante en el deterioro de la calidad del aire. Las partículas en estado sólido tienen la característica de deteriorar las fachadas de las estructuras urbanas y por supuesto generan deterioro en la salud humana (Ambisalud, 2008).

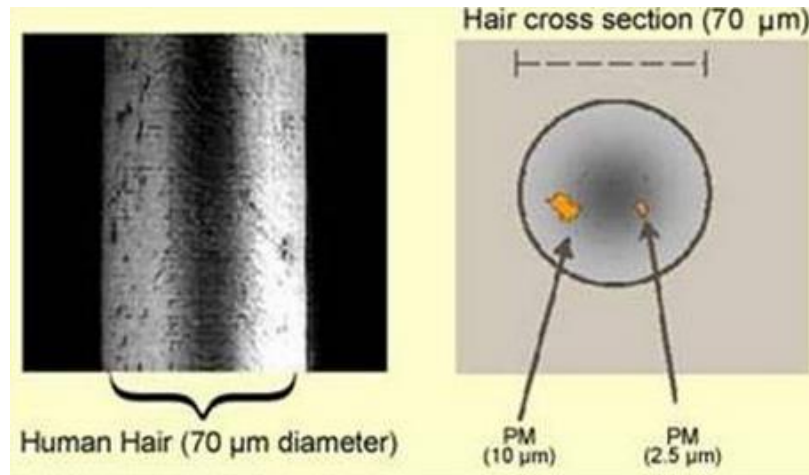
#### 5.1.7. Material Particulado (PM<sub>10</sub>)

El PM<sub>10</sub> se refiere a aquellas partículas suspendidas en el aire que se caracterizan por tener un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 µm. Con el propósito de comprender el tamaño del PM<sub>10</sub>, la Figura 3 hace una comparación con un cabello humano el cual oscila en un intervalo de 50 µm a 100 µm de diámetro; tomando como límite de referencia el PM<sub>10</sub>, existen un grupo de partículas aún más finas llegando a tener diámetros de hasta 0,1 µm.

La exposición a este tipo de partículas finas en personas con condición de cardiopatía puede causar muerte prematura debido a que las partículas pueden llegar hasta el torrente sanguíneo; en condiciones de salud más favorables las partículas pueden alojarse en los

pulmones y gradualmente deterioran el sistema respiratorio generando enfermedades respiratorias (Board, 2012).

**Figura 3.** Comparación de partículas finas con un cabello humano



**Fuente:** Board, 2012.

#### 5.1.8. Propiedades Ópticas de los Aerosoles

En la obtención de las propiedades ópticas de los aerosoles a través de datos de MODIS, es necesario seleccionar únicamente aquellos píxeles que se encuentren libres de nubes. En consecuencia, se han desarrollado algoritmos que permiten realizar correcciones para recuperar la información que se ha perdido a causa de este fenómeno (Sayer, et al., 2011), sin embargo, al aplicar correcciones a la imagen por la nubosidad, no se logra un recuperación suficiente de las propiedades ópticas de los aerosoles.

Para la resolución espacial de 250m la alteración de las propiedades ópticas no se manifiesta tanto como en resoluciones más gruesas, sin embargo, estos efectos pueden reducirse aún más cuando se lleva a cabo un análisis de la distribución espacial de los aerosoles, pues el desplazamiento de los aerosoles no es tan extenso como el que experimentan las nubes.

Algunas de las propiedades de los aerosoles más representativas y comúnmente estudiadas son el espesor óptico de los aerosoles, tamaño promedio de las partículas, dispersión simple del albedo y masa de la partícula. Para recuperar estas características de los aerosoles por medio de imágenes existen algunos métodos que realizan operaciones de manera individual para obtener cada parámetro y por supuesto también existen modelos matemáticos que permiten hacer operaciones híbridas con las que se obtienen todos los parámetros en un conjunto de imágenes (King M. , Kaufman, Menzel, & Tanré, 1992).



#### **5.1.9. Espesor Óptico de los Aerosoles (AEROSOL OPTICAL THICKNES)**

El espesor óptico de los aerosoles (AOT, por sus siglas en inglés), es el grado en el cual los aerosoles impiden la transmisión directa de la luz a la superficie terrestre ya sea porque absorben la energía o la dispersan en diferentes direcciones. El AOT o AOD (Aerosol Optical Depth) como también es llamado, se encuentra definido como un coeficiente de extinción integrado sobre la columna vertical en una sección transversal atmosférica. El coeficiente de extinción es el agotamiento fraccional de radiación por unidad de longitud de la trayectoria (también llamada atenuación especialmente en referencia a frecuencias de radar). El espesor óptico a lo largo de la dirección vertical también se denomina espesor óptico normal (en comparación con el espesor óptico a lo largo de longitud de la trayectoria inclinada) (NASA, 2011).

#### **5.1.10. Quema de Biomasa**

La *Quema de Biomasa* es un evento de origen espontaneo o deliberado, ligada a prácticas humanas que representa la quema de vegetación con o sin vida. Generalmente la quema de biomasa está asociada a actividades agrícolas con la finalidad de despejar áreas con disposición a la siembra de cultivos cubiertas de pastizales o maleza, o bien, con el propósito de facilitar el proceso de cosecha.

En un panorama mundial se lleva a cabo esta práctica, sin embargo, en América Latina es donde se registran mayores casos de quema de biomasa con propósitos agrícolas. Estas actividades tienen repercusiones negativas bastantes grandes sobre la calidad de aire en las zonas donde se llevan a cabo, produciendo no sólo material particulado sino también gases de efecto invernadero.

#### **5.1.11. PYTHON**

Es un lenguaje de programación de alto nivel con un enfoque a la programación orientada a objetos, la sintaxis y el tipado de este lenguaje lo hacen ideal para scripting y desarrollo ágil de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas. Tanto el intérprete Python como una extensa biblioteca estándar se encuentran a libre disposición en forma binaria y de código fuente el sitio web, <http://www.python.org/>, Python también puede usarse como un lenguaje de extensiones para aplicaciones personalizables (Van Rossum, 2009).

#### **5.1.12. AIRVIRO**

Airviro es un sistema de Gestión de la Calidad del Aire con plataforma web, <http://www.airviro.smhi.se/airviro/> que realiza inventario de emisiones a través del almacenamiento de datos meteorológicos conservados como series de tiempo, utiliza modelos de dispersión Gaussianos de para evaluar el comportamiento de contaminantes, la Figura 4 representa los resultados que se obtienen. Fue desarrollado por SMHI y *apertum IT AB* en 1990 con un desarrollo ininterrumpido. El manejo de datos meteorológicos y de calidad del aire son almacenados como series de tiempo y pueden ser validados por medio

del software web, por tal razón son utilizados por tomadores de decisiones ya sea a nivel local o nacional, industrias y entidades privadas y públicas al nivel mundial dado que este un sistema escalable. (Institute, 2010)

**Figura 4.** Modelo de dispersión Gaussiano



**Fuente:** Institute, 2010

## 5.2. MARCO TEÓRICO

Para conceptualizar acerca de la contaminación atmosférica, principalmente del material particulado ya que es objeto de este estudio, es necesario discernir que existe material particulado en ambiente aéreo y ambiente acuático. El concepto de material particulado en el medio acuático es fuerte indicador de la calidad de agua, puede también ser factor que indique turbidez de la misma siendo una condición de aguas oceánicas y de ríos (Pleskachevsky *et al*, 2005).

Ahora bien, se ha enfatizado en este documento la necesidad de mantener un control constante de la contaminación atmosférica por material particulado y con este fin se han desarrollado en el mundo algunas metodologías entre las que se destaca la medición puntual con estaciones fijas en tierra o la red global AERONET y otras que suponen una fuente de información de tipo área como los sensores remotos.

Una estrategia utilizada en los estudios realizados mediante sensores remotos es el desarrollo de algoritmos que cuantifican las cantidades de contaminantes en la atmósfera y de esta manera llevar a cabo un monitoreo de este fenómeno; siguiendo el anterior orden de ideas Othman *et al.*, (2010) propuso un algoritmo que basa su operatividad en teorías de transferencia radiativa (Dispersión de mie y dispersión de Rayleigh) que relacionan la radiancia al tope de la atmosfera, la cual indica la cantidad total de energía irradiada por unidad de área, y la reflectancia de la superficie terrestre que se define como la radiación de energía reflejada por la superficie de la tierra.

### 5.2.1. Reflectancia Superficial

Antes de definir el concepto de reflectancia superficial es necesario conceptualizar acerca de la geometría de iluminación y de observaciones del momento de la captura de la imagen, pues de esto depende en gran parte el producto ofrecido por la reflectancia de la superficie (Kaufman & Tanré, 1998; CONAE, 2012).

La geometría de iluminación es la posición relativa del sol con respecto a la tierra en el momento de la toma, ya que para la toma de la imagen el centro geométrico es la tierra se asume está en una postura estática. Los ángulos que determinan esta geometría son el cenital solar y el azimutal solar, donde el ángulo cenital ( $\theta_z$ ) representa la posición del sol relativa al plano perpendicular del observador, en este caso se ubica el observador en la fracción terrestre captada por la imagen, varía de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y se expresa mediante la Ecuación (1).

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (1)$$

Donde  $\delta$  corresponde a la declinación solar,  $\varphi$  corresponde a la latitud del lugar de captura y  $\omega$  es al ángulo horario el cual se determina a partir de la hora de captura. Por otra parte, el ángulo acimutal ( $\varphi_o$ ) es el ángulo determinado por la proyección de la posición del sol sobre la superficie de la tierra el cual varía de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  y dependiendo del hemisferio de captura se tiene una variación en su estimación, donde para el hemisferio sur se antepone un signo negativo y para el hemisferio norte se antepone un signo positivo como la indican las Ecuaciones (2) y (3).

$$\sin(\varphi_o) = \pm \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\theta_o)} \quad (2)$$

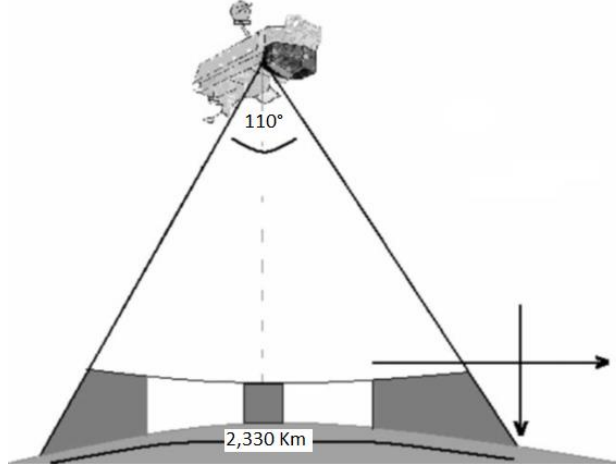
$$\cos(\varphi_o) = \pm \frac{\sin(\varphi) \cos(\theta_o) - \sin(\delta)}{\cos \varphi \sin(\theta_o)} \quad (3)$$

Entonces la geometría de iluminación orienta las condiciones de posición en la relación tierra – sol, teoría importante puesto que la dirección de incidencia de los rayos solares varía según la hora del día y por ende la posición del sol con respecto a la tierra. Ahora bien, la geometría de observación es la relación de la posición del sensor con respecto a la tierra, donde al igual que para la geometría de iluminación se involucran dos ángulos los cuales son el cenital de observación y el azimutal de observación, donde el ángulo cenital ( $\theta_v$ ) representa la posición del sensor en relación con la normal del observador, donde la normal se sitúa en la fracción de la superficie que es blanco de la toma de la imagen y se expresa mediante la Ecuación (4).

$$\theta_v = \sin^{-1} \left( \left( 1 + \frac{h}{R_T} \right) * \sin \eta \right) \quad (4)$$

Donde  $h$  representa la altura del sensor con respecto a la superficie de la tierra,  $R_T$  es equivalente al radio del planeta y  $\eta$  es el ángulo de barrido del sensor de  $110^\circ$ , equivalente a 2,330 Km como lo se indica en la Figura 5, donde el índice  $(1 + (h / R_T))$  hace una estimación de la curvatura terrestre, y supone que el recorrido orbital del sensor es de forma circular uniforme (García-Mora *et al*, 2011).

**Figura 5.** Angulo de barrido del sensor



**Fuente:** (García-Mora *et al.*, 2011)

El ángulo azimutal de observación viene determinado por la proyección del sensor sobre la superficie de la tierra y se obtiene por las Ecuaciones (5) y (6):

$$\sin(\varphi) = \frac{\sin(\lambda_s - \lambda_p) \cos(\varphi_s)}{\sin \psi} \quad (5)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{\sin(\varphi_s) - \sin(\varphi_p) \cos(\psi)}{\sin \psi \cos(\varphi_p)} \quad (6)$$

Donde  $\varphi_s$  y  $\lambda_s$  son la latitud y longitud del punto sub-satelital normal proyectado por el sensor a la superficie terrestre,  $\varphi_p$  y  $\lambda_p$  son la latitud y longitud del pixel observado sobre la línea de barrido y  $\psi$  es el ángulo de dispersión, el cual se define a continuación.

Para comprender el rol de la geometría de observación e iluminación, es importante destacar que en la conceptualización física de la contaminación atmosférica todas las

partículas generan una dispersión o retrodispersión de los rayos de luz incidentes en ella; esta dispersión depende de la relación que existe entre el tamaño las partículas dado por el diámetro, asumiendo una forma esférica para estas, representado por  $\Phi$  y que para este caso es de  $10\mu m$ , y la longitud de onda en que se desea evaluar, representado por  $\lambda$ .

Existen diferentes teorías físicas que explican este fenómeno entre las que se destacan la teoría de dispersión de Mie, teoría de dispersión de Rayleigh y la teoría de dispersión no selectiva. Las cuales se explican de la siguiente manera, respectivamente:

- Si  $\Phi \ll \lambda$  se aplica la teoría de dispersión de Rayleigh, donde esta teoría es válida sólo para partículas con  $\Phi < 0.03 \mu m$ .
- Si  $\Phi \sim \lambda$  se aplica la teoría más general de las partículas, la teoría de dispersión de Mie, la cual es aplicable a este caso de estudio pues las partículas que conforman los aerosoles atmosféricos varían en un rango entre  $0.03 \mu m < \Phi < 10 \mu m$ , por ende para la dispersión de luz por partículas que conforman aerosoles es útil esta teoría.
- Finalmente, Si  $\Phi \gg \lambda$  se considera de poca utilidad para determinar la dispersión de luz provocada por las partículas que conforman los aerosoles.

A partir del planteamiento de estas tres teorías es necesario conocer la redistribución angular que sufre la luz incidente en las partículas. Al aplicar la teoría de Mie se tiene que dependiendo del tamaño y naturaleza de la partícula así mismo será esta redistribución, por ello mediante la Ecuación (7) se puede estimar la nueva dirección de los rayos incidentes.

$$\psi = \cos^{-1}(1 \cos \theta_z \cos \theta_v - (\sqrt{1 - \cos^2 \theta_z} * \sqrt{1 - \cos^2 \theta_v}) * \cos \varphi) \quad (7)$$

Donde  $\theta_z$  está dado por la Ecuación (1) y representa el ángulo cenital solar;  $\theta_v$  está dado por la Ecuación (4) y representa el ángulo cenital de observación, y finalmente  $\varphi$  representa el ángulo azimutal relativo, que es la diferencia entre los ángulos azimutales de observación e iluminación. Con el ángulo de dispersión entonces se puede obtener el patrón final de redireccionamiento que sufre el haz de luz cuando es dispersado por la partícula, esta estimación se lleva a cabo mediante la función fase de dispersión ( $P(\psi)$ ), la cual define la probabilidad de que un haz de luz que viene en dirección  $\theta_z$  sea dispersado en otra dirección que es definida por  $\theta_v$ , donde se resalta que la probabilidad de que ocurre dispersión hacia adelante o retrodispersión es la misma (Remer *et al.*, 2005; Blesa *et al.*, 2005). Esta función se expresa mediante la Ecuación (8).

$$P(\psi) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \psi) \quad (8)$$

Sin embargo, Young (1980), sugirió que al aplicar un factor de despolarización la estimación del redireccionamiento de los fotones de luz tiene una menor incertidumbre debido a la anisotropía de las partículas; entonces al aplicar esta corrección la Ecuación (8) pasa a ser reemplazada por la Ecuación (9), la cual se expresa de la siguiente forma:

$$P(\psi) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \psi) \left( \frac{1 - \delta_{Ray}}{1 + 2\delta_{Ray}} \right) \quad (9)$$

Donde  $\delta_{Ray}$  es la constante de despolarización equivalente a 0.0279. Entonces, con la estimación de la función fase de dispersión aplicada a la luz incidente, se tiene la corrección efectiva para discriminar la dispersión provocada por las partículas y de la misma forma la cantidad de fotones de luz que llega directamente a la superficie terrestre (Remer *et al.*, 2001).

Ahora bien, la contribución de la reflectancia superficial en la obtención del espesor óptico de aerosoles radica en la variabilidad de las coberturas terrestres, pues según la intensidad de energía reflejada por la superficie se crean efectos de absorción y dispersión en los aerosoles, por ejemplo, para superficies oscuras como vegetación y algunos tipos de suelos, se tienen efectos predominantes de dispersión mientras que para superficies con brillos tales como arenas saharianas, suelos erosionados entre otros, se tienen efectos mixtos de dispersión y absorción (Liang *et al.*, 2001).

La predominancia de brillo en suelos sin cobertura vegetal tiene una relación inversamente proporcional a las longitudes de onda del espectro electromagnético, pues se presentan menores índices de reflectancia superficial en cuanto se aumentan las longitudes de onda, es decir, en presencia de vegetación se tienen valores bajos de reflectancia superficial en los canales visibles debido a la absorción de energía de la clorofila, y en los canales de infrarrojo cercano ocurre una situación similar debido a la absorción de agua por parte de las plantas (Kaufman & Tanré, 1998; Chavez, 1996; Remer *et al.*, 2005). Por consiguiente, para el caso de estudio, la reflectancia atmosférica es un factor aplicado para corregir los efectos provocados por la variabilidad de la energía irradiada por las diferentes coberturas terrestres y se expresa mediante la Ecuación (10) (Chavez, 1996; Schroeder *et al.*, 2006).

$$\rho^k = \frac{\pi^* (L^k - L_r)}{T_v (E_0 d^{-2} \cos(\theta_z) T_z + E_{\lambda down})} \quad (10)$$

Donde  $L^k$  es la radiancia al tope de la atmosfera que en este caso son los valores de radiancia codificados por el sensor MODIS en la imagen utilizada,  $L_r$  es la radiancia de Rayleigh con unidades  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$  la cual será discutida más adelante;  $T_v$  es el coeficiente de transmisión atmosférica en camino del sensor a la tierra;  $T_z$  es el coeficiente de transmisión atmosférica en camino del sol a la tierra;  $E_0$  es la irradiancia solar espectral en una superficie perpendicular a los rayos solares fuera de la atmosfera con unidades

$Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ;  $d$  es la distancia de la tierra al sol en unidades astronómicas AUs en función de la fecha y hora de la captura de la imagen y finalmente  $\theta_z$  es el ángulo cenital de incidencia de los rayos de sol a la superficie terrestre en el momento de la captura de la imagen.

La radiancia de Rayleigh se basa en la suposición de una atmosfera que solo contiene partículas de forma esférica y se considera con la siguiente ecuación:

$$L_r = \frac{E_0 P_m}{4\pi d^2 \cos \theta_v} * e \left( \frac{-P_m}{\cos \theta_v} \right) * e \left( \frac{-P_m}{\cos \theta_s} \right) * (P(\psi) + 0.052P(\psi)) \quad (11)$$

Donde  $\rho_m$  es el espesor óptico molecular alcanzado por las partículas en una atmosfera tipo Rayleigh y se define con la ecuación 14 de la siguiente manera:

$$\rho_m = 0.008569\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \quad (12)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda efectiva que se está evaluando (Kaufman Y. , 1989).

### 5.2.2. Propiedades Ópticas de los Aerosoles

Además de la dispersión, las partículas atmosféricas ejercen otro tipo de acciones sobre la energía irradiada por el sol, una de estas es la absorción. Una de las propiedades ópticas de los aerosoles que explica la relación entre la absorción y la dispersión de luz provocada por las partículas es el albedo de dispersión simple, el cual define la extinción de energía provocada por las partículas (Kaufman Y. et al., 1997; Kaufman & Tanré, 1998; García, 2010).

El albedo de dispersión simple ( $\omega_0$ ) es un indicador de la capacidad que tienen los aerosoles de distinto tamaño y naturaleza, en este caso PM<sub>10</sub>, de absorber o dispersar la energía irradiada; esta relación define la extinción provocada por las partículas ya que la absorción reduce la intensidad total disponible del haz de luz que interactúa con cualquier partícula en relación con la energía dispersada (Esteve, 2010; Blesa et al., 2005), se expresa mediante la Ecuación (13)

$$\omega_0 = \frac{\sigma_d}{(\sigma_d + \sigma_a)} \quad (13)$$

Donde  $\sigma_d$  representa la sección eficaz de dispersión de la columna atmosférica y  $\sigma_a$  representa la sección eficaz de absorción de la misma. Los valores arrojados por esta expresión oscilan entre 0 y 1 donde se define como  $X \sim 0$  partículas muy absorbentes y para  $X \sim 1$  partículas poco absorbentes.



La teoría de dispersión de Rayleigh explica que existe un 50% de probabilidades de que la energía sea dispersada hacia atrás, condición conocida como retrodispersión, y 50% de probabilidades de que la energía sea dispersada hacia adelante; donde la dispersión en ángulos diferentes de 0° y 180° es casi que nula por lo que no se tiene en cuenta. Otro punto que aborda esta teoría es la relación entre el tamaño de la longitud de onda y la partícula, donde las contribuciones de energía con longitudes de onda relativamente bajas son más propensas a ser dispersadas que las de mayor longitud, entonces según esta condición el momento del día donde hay mayor probabilidad de dispersión eficaz corresponde a las horas de la tarde debido a que el recorrido de la radiación es mucho mayor, todo esto debido a la posición y ángulo que adopta el sol, lo que se define como geometría de iluminación (García, 2010; Esteve, 2011; Kaufman & Tanré, 1998).

Tras la interacción entre la radiación solar y las partículas presentes en la atmosfera es necesario caracterizar la carga total de aerosoles, para esto existe una propiedad denominada espesor óptico de aerosoles o como se ha definido en capítulos anteriores **AOT**. El AOT indica la extinción de radiación total de energía irradiada por la absorción y dispersión provocada por todas las partículas que se encuentran en la atmosfera, el AOT depende de la longitud de onda y de la naturaleza de las partículas, es un indicador adimensional normalizado en la vertical de la atmosfera con valores que oscilan entre 0 y 1, siendo valores próximos a “0” sinónimo de carga de partículas finas y valores próximos a “1” carga de partículas gruesas.

Por consiguiente, el AOT ( $\tau_a$ ) es la relación definitiva que existe entre la radiación emitida por el sol, en una determinada posición con respecto a la tierra, con la naturaleza de las partículas presentes en la atmosfera (Esteve, 2011; Kaufman *et al.*, 1998; Kaufman *et al.*, 1997); las cuales desempeñan un rol definitivo en la cantidad de energía por unidad de área que recibe la superficie de la tierra y posteriormente captada por el sensor, en este caso MODIS. El AOT se expresa de forma numérica a través de la Ecuación (14).

$$\tau_a = 4\mu_s\mu_v \frac{\rho_a - \rho_m - \rho^k T}{\omega_0 P(\psi)} \quad (14)$$

Donde  $\mu_s$  es el coseno del ángulo cenital solar,  $\mu_v$  es el coseno del ángulo cenital de observación,  $\rho^k$  que corresponde a la reflectancia de la superficie,  $\rho_m$  que es el espesor óptico molecular,  $\omega_0$  que es el albedo de dispersión simple,  $P(\psi)$  es la función fase de dispersión,  $T$  que corresponde a la transmitancia atmosférica la que se refiere a las características que poseen los cuerpos de absorber y ser atravesados por un haz de luz en determinadas longitudes de onda (Tanabu et al., 2009), y  $\rho_a$  que es la reflectancia aparente que se expresa por la Ecuación 15:

$$\rho_a(\lambda) = \frac{\pi d^2 L^k}{E_0 \mu_s \mu_v} \quad (15)$$



La reflectancia atmosférica es la conversión de valores digitales codificados en tono de grises denominado brillo, a valores de reflectividad a partir de la radiancia al tope de la atmosfera, en este caso  $L^k$  corresponde a la imagen MODIS que se encuentra corregida a nivel de TOA (Brizuela et al., 2007), como es necesario para este procedimiento.

Otro aspecto que contempla la teoría de Mie es la radiación que emiten las partículas luego de redireccionar los fotones de luz provenientes del sol. El AOT es la relación de extinción de radiación producida por la carga total de aerosoles, entonces la energía dispersada por estos se obtiene a través de la dispersión simple de los aerosoles (Kaufman & Tanré, 1998) y se expresa por la Ecuación (16)

$$\rho_a = \frac{\omega_0 \tau_a P(\psi)}{4\mu_s \mu_v} \quad (16)$$

Donde  $\omega_0$  es el albedo de dispersión simple,  $\tau_a$  es equivalente a AOT,  $P(\psi)$  es la función fase de dispersión,  $\mu_s$  y  $\mu_v$  son el coseno del ángulo cenital solar y el ángulo de observación respectivamente. En términos más específicos la dispersión simple de aerosoles o dispersión de Mie ( $\rho_a$ ), es la cuantificación de energía irradiada por las partículas (King et al., 1999; Fukushima et al, 1998).

Finalmente, luego de cuantificar la radiación que ha sido dispersada por las partículas se debe definir la corrección del camino que toma dicha radiación, donde para conseguir esto es necesario relacionar la carga total de aerosoles con la energía irradiada por las partículas, esta relación se expresa mediante la Ecuación (17) que define la reflectancia atmosférica ( $\rho_{atm}$ ) generada por las partículas suspendidas (Kaufman & Tanré, 1998).

$$\rho_{atm} = \tau_a + \rho_a \quad (17)$$

Donde  $\rho_a$  es la dispersión simple de aerosoles y  $\tau_a$  es el espesor óptico de aerosoles AOT.

### 5.2.3. Algoritmo Multiespectral de PM10

Basándose en el análisis realizado a las teorías de dispersión de energía provocada por partículas, *Mie y Rayleigh para este caso*, Othman et al., (2010) propusieron el desarrollo de un algoritmo multiespectral para la detección de la masa de material particulado con diámetro de 10µm presente en la atmósfera.

Este algoritmo multiespectral considera dos aspectos teóricos importantes para su aplicación; inicialmente se considera que la zona de estudio es una superficie lambertiana con propiedades homogéneas en toda su área y segundo que existe una equivalencia entre las características de la distribución espacial de AOT y de PM10, condición que sugiere que la mayor cantidad de partículas que son detectadas por sensores remotos en la columna atmosférica son PM10, este planteamiento no sólo es considerado por el autor en discusión,

ha sido utilizada en otras ocasiones (Kaufman et al., 1998; Kumar et al., 2008; Kaufman et al., 2009; Song et al., 2009). Para efectos de cuantificar partículas en suspensión dicha equivalencia se expresa por la Ecuación (18)

$$AOT = a_0 * R_{\lambda} \quad (18)$$

Donde  $a_0$  es un coeficiente que se obtiene a partir de la correlación lineal entre la reflectancia atmosférica producida por las partículas y los niveles máximos permisibles de PM<sub>10</sub> según sea la zona de estudio, y  $R_{\lambda}$  representa la reflectancia atmosférica en una única longitud de onda. Sin embargo, la Ecuación (18) no es aplicable aún, puesto que no considera las longitudes de onda necesarias para este caso de estudio (Othman et al., 2010), entonces esta consideración es aplicada y se obtiene:

$$AOT = a_0 * R_{\lambda 1} + a_1 * R_{\lambda 3} + a_{02} * R_{\lambda 4} \quad (19)$$

La cual es aplicada para la reflectancia atmosférica en los canales 1, 3 y 4 del sensor MODIS TERRA. De esta manera se obtiene un algoritmo multispectral que permite cuantificar la concentración de niveles permisibles de PM<sub>10</sub> en unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para este caso de estudio en la región sur del Valle del Cauca – Colombia.

### 5.3. MARCO REFERENCIAL

#### 5.3.1. Panorama Mundial

El *Material Particulado en Suspensión* es un contaminante atmosférico de procedencia natural o antropogénica que no puede ser clasificado como un único contaminante, pues es una mezcla heterogénea de diversos materiales que poseen características químicas, físicas y termodinámicas particulares (Arciniégas, 2012); la normatividad colombiana indica que el material particulado permanece suspendido en el aire debido a su forma y densidad, por esta razón se clasifica por su tamaño, donde se definen partículas finas o inhalables, que se caracterizan por tener un diámetro aerodinámico  $\leq 10 \mu\text{m}$ , y las partículas gruesas con diámetros  $\geq 10 \mu\text{m}$ . (MAVDT, 2010).

La contaminación atmosférica representa una problemática a nivel mundial, pues sus efectos se manifiestan sobre los seres humanos, animales, vegetación, materiales de infraestructura, condiciones meteorológicas, entre otros (Rodríguez et al., 2001; Aldunate et al., 2006; Kaskaoutis et al., 2008). El panorama mundial de las investigaciones más recientes acerca del material particulado muestra que se han desarrollado diversas técnicas de medición.


En las costas del Sur-Este de Italia (Perrone et al., 2006), llevó a cabo una recolección de muestras diarias de aire por medio del instrumento FH 95 fabricado por la compañía ESM

Andersen en el periodo definido desde el 6 de Noviembre hasta el 6 de Diciembre del 2003, con el propósito de hacer una caracterización de material particulado. Posteriormente, las muestras recolectadas se sometieron a diferentes análisis para realizar la caracterización del PM; Inicialmente se utilizó un escáner microscópico de Rayos-X para electrones modelo XL-20, que determina las características morfológicas de las muestras, permitiendo hacer un análisis semicuantitativo de las mismas, posteriormente con el objetivo de hacer una distribución de aniones y cationes de los elementos que se obtuvieron del análisis morfológico se utilizó un cromatógrafo de iones de alto rendimiento modelo DIONEX DX-500. Finalmente, para determinar la concentración de elementos metálicos dentro las muestras se utilizó un emisor atómico de plasma acoplado inductivamente a un espectrómetro.

Los resultados de la investigación indicaron que el análisis de concentración de metales demostró que el 1% del volumen total de las muestras son elementos metálicos de procedencia antropogénica y de origen costero; La cromatografía de iones mostró que el 38% del volumen total de las muestras son iones pertenecientes a las sales marinas de la zona de estudio. Finalmente, el estudio de RAYOS-X aplicado para determinar la morfología de los contaminantes, mostró que el 90% de las muestras presentan un diámetro  $\leq 5 \mu\text{m}$ .

El método aplicado por los autores italianos deja en manifiesto una potente capacidad para caracterizar el tipo de elemento químico que compone la masa total de PM<sub>10</sub> de la zona de estudio, sin embargo, cabe notar que es un método que presenta falencias en el ámbito espacial y en la determinación total de concentración de partículas; Por lo anterior, se crea una necesidad de expandir las fronteras espaciales de los métodos a utilizar, pues es una mayor necesidad para determinar niveles permitidos legalmente según las jurisdicciones de cada país, como es el caso de Colombia (MAVDT, 2010).

La NASA, a través de su programa MODIS, desarrolló un producto en el que se compilan diariamente todas las variables de estudio de la contaminación por aerosoles en la atmosfera (MOD04) y Agua (MYD04), cabe aclarar que en el producto MYD04 no se enfatizará ya que no es objeto de este estudio en particular. Por otra parte, MOD04 es una propuesta muy atractiva para la investigación, pues permite el acceso a variables como Profundidad Óptica en Tierra Corregida (*Corrected Optical Depth Land*), Exponente de Angstrom en Tierra (*Angstrom Exponent Land*), entre otros (Levy *et al.*, 2009). MOD04 posee una gran ventaja espectral y temporal, cubriendo grandes porciones de territorio, sin embargo, su resolución espacial consta de celdas de 10 por 10 Km, cifra que no deja lugar a estudios de detalle, por ello, países de grandes extensiones como China, EUA, Rusia, India, entre otros; se han hecho expertos en el uso de este producto para fijar sus niveles de contaminación, y algunos países de menor extensión también se han adentrado en el uso de este producto que proporciona el sensor MODIS.

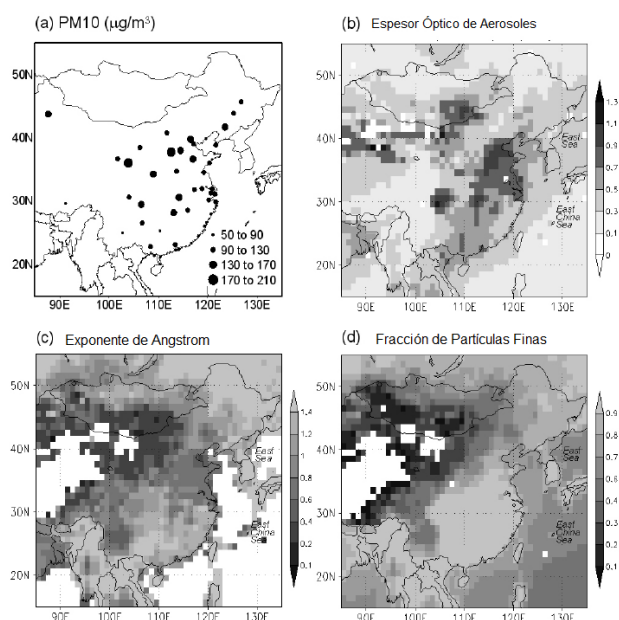


En China, la calidad del aire empeora de modo proporcional al acelerado crecimiento económico del país, situación que ha despertado la necesidad de hacer seguimiento a esta problemática mediante el análisis de la mayor extensión de territorio posible. Un estudio realizado en el año 2009 utilizó información del producto MOD04 que fue comparada con estaciones en tierra que miden la calidad de aire, lo cual es una técnica que permite un fortalecimiento de ambas fuentes de información. La metodología aplicada por los autores (Song *et al.*, 2009) sugiere que la calidad del aire está sujeta a las variaciones estacionales y a los cambios climáticos que se presenten.

Inicialmente, se recopilaron promedios diarios de contaminantes como PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en un periodo de 2 años que fue desde 2003 al 2005, con esta información y siguiendo los parámetros de la Agencia de Protección Ambiental China, se definieron Índices de Polución del Aire (API, por sus siglas en Ingles) referido a un nivel superficial. Con estos API se concluyó que la proporción de presencia de días contaminados de PM<sub>10</sub> sobre el total de los días de estudio fue de 93%, 96%, 94% y 84% en primavera, verano, otoño e invierno respectivamente.

El siguiente paso de la investigación consistió en adquirir la información del producto MODIS, para este caso particular se utilizaron las variables de AOD en la longitud de onda 0.55μm, exponente de Angstrom y fracción en modo fino en la longitud de onda 0.55μm, que indica la proporción de partículas finas sobre el total del AOD. Así como con los API estas variables de MODIS fueron promediadas en el mismo periodo de tiempo. Con el propósito de comparar ambas fuentes de información, se fragmentó el país en ocho regiones con diversas características topográficas climáticas y antropogénicas que influyen el comportamiento del PM<sub>10</sub> en la atmosfera. A partir de esta división territorial, y con los promedios anuales de cada una de las variables mencionadas, se elaboró una distribución espacial de cada una de ellas como lo indica la Figura 6.

**Figura 6.** Distribución espacial de PM<sub>10</sub> medido en 47 lugares. (a), MODIS AOD (b), MODIS Angstrom (c), MODIS Fracción de partículas finas (d).



**Fuente:** Song *et al.*, 2009

La distribución espacial sugiere la estrecha relación espacial que existe entre el total de aerosoles en la atmósfera, representado por el AOD, y la concentración de masa de PM<sub>10</sub> medida por estaciones de calidad de aire en tierra. A su vez, cabe destacar que la costa este de China mantiene un gran promedio de partículas de tamaño fino, mientras la región centro-oeste presenta un elevado promedio de partículas de tamaño grueso, situación que se ve reflejada en el promedio obtenido del coeficiente de Angstrom, pues esta variable sugiere la cantidad de masa según el tamaño de partícula.

Las imágenes obtenidas del producto MODIS sugieren que las características morfológicas del territorio Chino van de la mano con la presencia de aerosoles, pues se tiene que en las costas y en las zonas áridas el tipo de aerosol dominante es de tipo fino, mientras en aquellas regiones con mayor cobertura vegetal o artificial el tipo de aerosol que se encuentra en mayor proporción es el de tipo grueso.

El análisis de variación estacional a través de métodos de correlación simple, arrojó como resultado que para el verano en zonas áridas, secas y con excesivas actividades humanas, existe una gran relación entre el PM<sub>10</sub> y el AOD, debido a que las condiciones meteorológicas, principalmente vientos, generan una gran actividad en la vida aérea de las partículas, además, las altas temperaturas y poca de humedad causan que el tamaño de las partículas se mantenga constante durante este periodo estacional siendo de tipo fino.

Por el contrario, debido a la humedad provocada por el invierno las partículas aumentan su tamaño, pues estas funcionan como agentes absorbentes, pasando a ser de tipo grueso. El comportamiento de la contaminación atmosférica en el periodo de invierno sugiere que hay una reducción significativa del AOD y por consiguiente del PM<sub>10</sub> en zonas que no presentan una mayor actividad humana. La situación es diferente en los centros poblados, pues aunque existe reducción, no es tan significativa debido al uso de calefacciones mecánicas o rudimentarias.

Además de las estaciones de monitoreo en tierra, existen otro tipo de artefactos capaces de hacer estimaciones acerca de la calidad de aire. En la ciudad de Delhi, localizada en el territorio capital de la India, se llevó a cabo un estudio a la calidad de aire con el objetivo de estimar la capacidad que tienen los sensores remotos en los estudios atmosféricos e integrar sus resultados con medidores portátiles (Kumar *et al.*, 2008).

La información utilizada en este estudio proviene de tres fuentes diferentes. Primero, una comisión de campo utilizó un medidor de fotones solares simple que registra partículas hasta de 2,5  $\mu\text{m}$  las cuales son objeto de este estudio junto al PM<sub>10</sub>; Posteriormente, otra comisión de campo utilizó un muestreador gravimétrico para obtener la carga total de aerosoles, AOT; Finalmente, se utilizaron datos de MODIS para determinar el PM<sub>10</sub> contenido en la carga total de aerosoles en la zona de estudio.

Debido a que los datos AOD de MODIS tienen una resolución espacial de 5 Km por 5 Km, y los datos del medidor de fotones y del muestreador gravimétrico son puntuales; se generó una descompensación de escalas en la información. Otro factor referente a la información, fue la gran cantidad de datos recolectados con los medidores portátiles que podían estar dentro de un mismo pixel de AOD. Por estas razones, los autores aplicaron una bifurcación a la metodología planteada; la primera parte es una relación de pixel a pixel, donde todos los datos de los medidores portátiles que se encuentren en un pixel son promediados y relacionados al pixel de AOD, y la segunda es una relación de uno a muchos, donde se compara el pixel de AOD con cada uno de los datos de los medidores presenten en él.

La propuesta conceptual de la metodología implicó el desarrollo de un modelo de regresión lineal para cada caso, en estos modelos se involucraron variables meteorológicas como presión del aire al nivel del mar y humedad relativa las cuales explican la variabilidad en el comportamiento del PM, arrojando resultados más aproximados a la realidad. Cabe mencionar que estos modelos involucran tanto los datos AOD de MODIS como los datos de medidores portátiles.

Tras aplicar la metodología planteada, el análisis de los resultados obtenidos tuvo una importante serie de consideraciones relacionadas con el enfoque conceptual. El uso de variables meteorológicas demostró el rol que cumplen dentro de la dinámica de la contaminación atmosférica, pues gracias a su incorporación en el modelo se explicó cerca

del 70% de la variabilidad de los datos obtenidos en los medidores portátiles, se destaca que la meteorología se aplicó a los datos MODIS.

En el ámbito espacio-temporal, se concluyó que existe una gran equivalencia entre AOD y PM<sub>10</sub>, y que es apreciable situándose en un amplio margen de espacio y tiempo, donde la referencia que se hace al espacio corresponde a la relación de los datos a contrastar, es decir, cantidad y escala, pues aunque este estudio reveló una gran relación entre ambas variables, los autores manifiestan que puede ser mayor con datos de PM<sub>10</sub> menos puntuales.

Por su parte, los autores sugieren que si se desea aplicar la información obtenida a estudios de evaluación de impacto en la salud humana, la resolución es un factor importante a tener en cuenta, pues con datos AOD a escalas de 10 Km por 10 Km y de hasta 5 Km por 5 Km, la información sobre la superficie atmosférica puede ser demasiado generalizada, condición que hace compleja la labor de relacionar la información obtenida con los datos referentes a impactos sobre la salud.

Si bien es importante estudiar los impactos del material particulado sobre la salud humana, también es importante destacar las fuentes de emisión, pues son el referente espacial para hacer este tipo de análisis. Por esta razón, cabe mencionar que además de fuentes antropogénicas como la industria y movilidad, existen fuentes naturales como erosión y vientos; sin embargo, los aerosoles provienen también de incendios provocados o accidentales, no sólo de zonas urbanas, sino también de zonas rurales. En algunas ocasiones los incendios en las zonas rurales pueden salirse de control y generar graves problemas ambientales.

En el año 2010 sobre la ciudad de Moscú, ocurrió un evento extremo de incendios forestales que perturbó notablemente la calidad de aire de esta región, por lo que se inició un monitoreo diario de la zona donde se presentó el hecho, además de las zonas aledañas (Donkelaar *et al.*, 2011). El estudio se llevó a cabo con el uso de datos AOD de MODIS y datos provenientes de la Red Robótica de Aerosoles (AERONET, por sus siglas en inglés). Esta red se constituye de estaciones ubicadas en diferentes países alrededor del mundo. En Colombia se instaló una estación AERONET en la ciudad de Medellín, hecho que fortalece el estudio de la dinámica del aire a nivel local (Uninal, 2011).

Entre tanto, el análisis diario con ambas herramientas permitió determinar que el producto MOD04, a causa de su pobre resolución espacial, define como nubes diversos tipos de aerosoles, que sí son captados por AERONET en su funcionamiento, por tal razón, se creó una sinergia entre ambas fuentes de información, dando lugar a un análisis detallado de elementos atmosféricos en un gran margen espacial. La relación entre los datos se llevó a cabo aplicando modelos de correlación lineales, indicando que entre ellos existe una alta



relación, sin embargo, el uso de ambos radica en que se permite la caracterización de los aerosoles en la dinámica espacio-temporal del evento.

A partir de los estudios desarrollados por Kumar *et al.*, (2008), Songet *al.*, (2009), Donkelaar *et al.*, (2011), se evidencia la potente herramienta que representan los sensores remotos para el estudio de la contaminación atmosférica en grandes extensiones de territorio, pese a esto, algunos países de menor área como Malasia, debido a su cercanía a los continuos incendios forestales de Sumatra y condiciones climáticas ecuatoriales, también se encuentra afectado por la contaminación atmosférica, situación que motivó el monitoreo de aerosoles en la nación (NBC, 2005).

De acuerdo a Amanollahi *et al.*, (2011), debido a los altos costos que representa sostener una red de monitoreo de calidad de aire y la escasa distribución de la existente en el territorio nacional, se da lugar el uso de los sensores remotos aún cuando el área de estudio es relativamente pequeña en comparación a China. Para analizar el impacto en la calidad de aire por la “*Neblina*” ocasionada por incendios forestales en Sumatra, se definió un periodo de tiempo situado entre los años 2004 al 2006, haciendo énfasis especial en Julio y Agosto del 2005, en el que se adquirió información de estaciones en tierra que miden calidad de aire, con el objetivo de validar la información recuperada del sensor MODIS.

Para determinar la validez de los datos obtenidos del producto AOT de MODIS se aplicó una regresión no lineal mediante el componente *Excel* del paquete de *Microsoft Office* tomando el pixel correspondiente a la coordenada donde se encuentra ubicada cada una de las estaciones que componen la red de monitoreo a la calidad de aire en tierra. De antemano, se conocía que el radio de acción de las estaciones es de 50 Km, razón por la cual se tomaron 5 pixeles por estación para la correlación de la información.

El resultado preliminar que arrojó la regresión no lineal indica que para el periodo de estudio de dos años, existe una gran relación entre la carga total de aerosoles AOT y el PM<sub>10</sub> suponiendo que en gran proporción se tiene una equivalencia entre AOT y PM<sub>10</sub>, principalmente en los periodos secos, pues en la época de lluvias la relación entre estas variables disminuye notablemente.

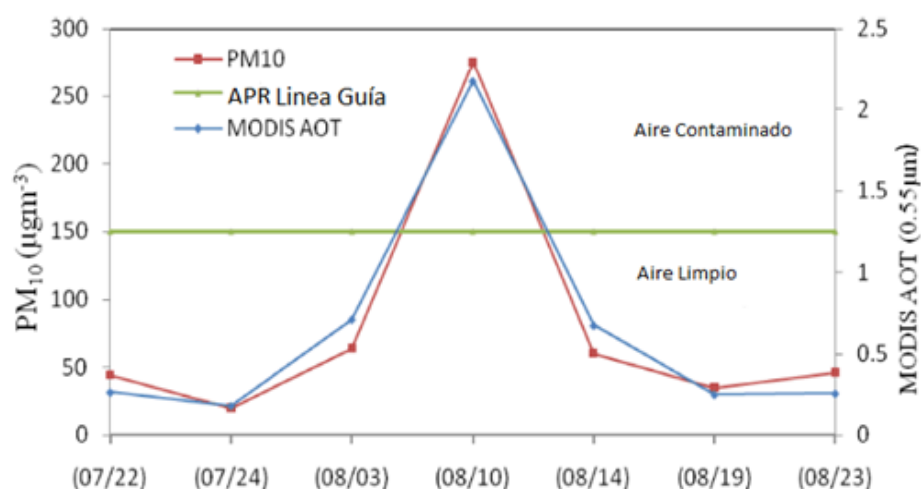
Los periodos secos coinciden con la llegada de la “*Neblina*” y los incendios de Sumatra, esta situación provocó un alarmante nivel de contaminación para el año 2005 entre los meses de Julio y Agosto; como se mencionó, en los periodos secos los datos MODIS tienen una gran fidelidad a los datos PM<sub>10</sub> y esta vez no fue la excepción, superando los niveles permitidos según las normatividades locales tal como se indica la Figura 7.

Tomando como referencia las evidencias anteriores, es posible concluir que el sensor MODIS posee una gran capacidad espectral en el ámbito atmosférico, pero, además de MODIS existen otros sensores que son capaces de evaluar la calidad del aire, como es el caso del sensor Landsat 7 ETM+.



Este sensor posee una resolución temporal de 15 días, cualidad que puede ser una desventaja pues en algunas situaciones las imágenes captadas se encuentran cubiertas por nubosidad, además de esto, debido a un daño ocurrido en el sensor desde el año 2003 las imágenes tienen un bandeo el cual representa pérdida de información (Ramos, 2009; Cea *et al.*, 2005), por lo que se han desarrollado diferentes técnicas para recuperar aquella información que se ha perdido (Rodríguez *et al.*, 2009), sin embargo, esta condición las convierte en información poco útil para investigaciones multitemporales en la temática atmosférica, pues debido a la baja respuesta espectral de las nubes y la pérdida de información por bandeo (López *et al.*, 2007) se generalizan tipos de aerosoles presentes en ellas (Donkelaar *et al.*, 2011).

**Figura 7.** Comparación de datos MODIS con datos PM10 para determinar el impacto de la "Neblina" sobre la calidad de aire, periodo de 22 de Junio al 23 de Agosto del 2005.



**Fuente:**(Amanollahi *et al.*, 2011)

Pese a lo anterior, se han realizado estudios utilizando como fuente de información principal imágenes captadas por en el sensor Landsat. En Makkah, región de Arabia Saudita (Othman *et al.*, 2010), a raíz del crecimiento urbano y particulares características topográficas, se llevó a cabo un estudio para medir la calidad del aire, y para probar la eficacia de los sensores remotos como herramienta de medición atmosférica. Se utilizaron dos imágenes del sensor Landsat 7 ETM+ que fueron procesadas y posteriormente validadas por medio de un medidor de aerosoles portable llamado DustTrak 8520.

Cada imagen Landsat fue debidamente georreferenciada por medio de puntos de control en campo, posteriormente se calculó la reflectividad aparente a TOA (Tope de la Atmosfera, por sus siglas en Ingles) para luego efectuar la corrección atmosférica convirtiendo la

reflectividad a TOA en reflectividad de la superficie, con la interacción de estas variables es posible obtener resultados de AOD más cercanos a la realidad, pues AOD es la carga total de aerosoles desde la superficie terrestre hasta el tope de la atmosfera - TOA.

Una vez pre-procesadas las imágenes, se aplicó un algoritmo multiespectral que utiliza las bandas 1, 2 y 3 con las longitudes de onda relacionadas en la (Chander, 2009)Tabla 3. A cada una de las bandas se aplicó el algoritmo que se basa en el cálculo de la reflectancia atmosférica emitida por el PM<sub>10</sub> a partir del AOT / AOD el cual es parte del algoritmo también.

**Tabla 3.** Longitudes de onda en el espectro electromagnético del sensor Landsat 7 ETM+

Banda	Rango Espectral	Longitud de Onda Efectiva
PAN	0,480–0,690	0,585
1P	0,433–0,453	0,443
1	0,450–0,515	0,483
2	0,525–0,605	0,565
3	0,633–0,690	0,662
4	0,775–0,805	0,790
4P	0,845–0,890	0,868
5P	1,200–1,300	1,250
5	1,550–1,750	1,650
7	2,080–2,350	2,215

**Fuente:** (Chander *et al.*, 2009)

Una vez se ha obtenido la reflectancia atmosférica, se relacionan cada una de las tres bandas con los datos obtenidos del medidor portátil DustTrak a través de una correlación lineal simple la cual es útil para dos propósitos, pues, si bien se ha obtenido la reflectancia emitida por el material particulado, no se tiene una cuantificación de masa en las unidades correspondientes que son  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Microgramo por Metro Cúbico), entonces esta relación permite la conversión de estos valores a unidades cuantificables, y además, permite la validación de los resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo multiespectral a las imágenes, arrojando coeficientes de correlación por encima de  $R = 0.8$ , lo que sugiere la validez y utilidad del algoritmo aplicado por los autores.

El panorama mundial expuesto sugiere que existe una gran variedad de métodos e implementación de nuevas tecnologías para la medición y seguimiento a la calidad del aire, hecho que demuestra la importancia de esta actividad científica. Principalmente, se destaca el gran desarrollo y utilidad de los sensores remotos como fuente de información, dejando de ser referentes de posición de actividades de emisión para convertirse en una versátil

técnica que acompañada de datos estacionarios adquiridos por otras fuentes como estaciones en tierra y demás, permite una modelación muy cercana a la realidad de la situación atmosférica.

### **5.3.2. Panorama Local: América Latina y el Caribe**

En América Latina y el Caribe se han evaluado las características de las fuentes de emisión y los métodos empleados para el inventario de aerosoles, en relación con la medición de calidad de aire.

Además de consumir grandes extensiones de territorio, los incendios forestales en América Latina y el Caribe representan una de las mayores fuentes de emisión de  $PM_{10}$  entre otros contaminantes atmosféricos, debido a la incorporación de sistemas de producción agrícola donde es necesario el uso de quema para la erradicación de capa vegetal (por ejemplo, la producción de caña de azúcar) y algunos factores naturales como las altas temperaturas, especialmente en los países estacionarios. Algunos de los países en los que se presenta este fenómeno con mayor frecuencia son Brasil, Argentina, Bolivia, Colombia y Venezuela, entre otros (FAO, 2007; PNUMA, 2010).

El seguimiento a los incendios forestales se hace complejo puesto que no se puede diferenciar si el origen de los mismos es por causa antropica o natural, además, no existen consensos en la definición de metodologías para cuantificar incendios y medir contaminación generada por estos eventos. En vista de la alta ocurrencia de estos eventos, y del desarrollo que se experimenta en la región latinoamericana se han desarrollado alianzas entre países para la ejecución de programas de seguimiento y monitoreo a los incendios, involucrando los institutos nacionales de meteorología, principalmente en países de Centro América como Costa Rica, Honduras, Guatemala, entre otros. Para el caso de Sur América los países operan de manera individual, pero, al interior de cada uno existen conexiones entre las diversas instituciones de orden nacional con el fin de evaluar estos fenómenos, principalmente de la mano de los institutos meteorológicos. Algunas ciudades de América Latina y el Caribe como Río de Janeiro, São Paulo, Buenos Aires y Ciudad de México, experimentan hoy en día gran crecimiento urbano e industrial, con un desarrollo económico desmedido que se ve difícilmente sostenido por los recursos naturales y económicos de sus respectivas regiones. Esta situación es otro factor importante que contribuye al deterioro de la calidad del aire para la región debido al incremento en la combustión por automóviles, industrias, prácticas humanas, entre otras actividades; sumado a esto el clima y altura de ciudades como Bogotá, Valle de México, entre otras, propician un medio adecuado para la dinámica de la contaminación atmosférica (PNUMA, 2010). Gracias a la evolución de la ciencia de la contaminación atmosférica es posible que países de Latinoamérica adopten métodos de medición de la calidad de aire lo que permite que se realicen procesos de simulación y modelación retrospectiva, esto con el fin de tomar

medidas si los resultados de los pronósticos arrojan resultados poco alentadores, como por ejemplo en Santiago de Chile (Schmitz & Falvey, 2007) se aplicó el modelo de simulación denominado Cassmassi utilizando los datos de la red de calidad de aire (MACAM) del área metropolitana de Santiago.

El modelo se basa en el desarrollo de algoritmos de regresión múltiple mediante la relación que existe entre aquellas variables predictoras y la variable a predecir. Las variables predictoras son las condiciones meteorológicas tales como comportamiento de viento, capa de mezcla de aire, temperatura, humedad relativa, entre otras; ya que son las participantes de la dinámica de transporte químico o dinámica de aire. Mientras que la variable a predecir son los contaminantes presentes en el aire que en este caso fue PM10.

El modelo Cassmassi conjuga el análisis de dicha información para arrojar un esquema del posible comportamiento de la variable a predecir, para el caso de este estudio se realizó el pronóstico para un periodo de 24 horas partiendo de información de un periodo de 24 horas del día anterior. Una de las particularidades de este modelo es que arroja resultados para cada una de las estaciones de las cuales se ha tomado información base, sin embargo, el análisis posterior no se tomó en cuenta este factor generalizando así toda la información generada.

Los resultados que se obtuvieron fueron alentadores pues permitieron que el intendente de la ciudad pudiese tomar la determinación de restringir el tráfico vehicular o la producción industrial si es que la contaminación supera los umbrales establecidos (PNUMA, 2010). Sin embargo, el modelo no presenta resultados alentadores para episodios de evento tales como incendios repentinos, asociándose esta situación a fuentes de error como los coeficientes del modelo Cassmassi, el método matemático del modelo Cassmassi, el uso de la Altura de capa de mezcla (PMCA), la aplicación del Índice de contaminación atmosférica (ICAP) e información meteorológica disponible.

En ciudad de México el crecimiento industrial ha generado la necesidad de monitorear la calidad de aire, un caso que refleja esto es el estudio realizado en Iztapalapa (Velasco *et al.*, 2005) en el cual se hizo un inventario de las emisiones de CO<sub>2</sub> en las zonas de aglomeración industrial, utilizando torres de medición de flujos compuestas por anemómetros que suministró información para emplear el método de covarianza de Eddy. Los resultados indicaron que en el día hay una aparente limpieza del aire, sin embargo, en horas de la mañana precisamente desde las 4:00 am hasta las 9:00 am se observa un incremento del flujo de contaminantes especialmente de CO<sub>2</sub>. También el estudio contiene un análisis de población afectada mediante la generación de un polígono de distribución de aire que intersecta viviendas y zonas aledañas afectadas por el transporte químico de elementos.

Otra gran ciudad de América Latina que ha empleado dispositivos de medición, similares en funcionamiento a la covarianza Eddy, es Sao Paulo, en el año 2001 (Sanchez-Ccoyllo *et al.*, 2002) se utilizaron filtros de aire con una porosidad variable de 2 a 10  $\mu\text{m}$  con el propósito no sólo de inventariar material particulado sino también otras especies de sustancias químicas causantes del deterioro de aire tales como S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, V, Fe, Ni, Cu, Zn, Br y Pb. Estos filtros retienen muestras que son analizadas a través de métodos estadísticos como “*factor análisis*” que se utiliza para estudios en dimensiones reducidas. Se asociaron las muestras encontradas a fuentes generadoras, posteriormente se aplicó un nuevo modelo estadístico denominado “*Source contributions*” para determinar las contribuciones de cada una de las fuentes definidas analizando las trazas de cada una de las muestras y su rotación con respecto a las condiciones meteorológicas de toda la zona de estudio.

En Colombia ciudades como Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla entre otras presentan un acelerado comportamiento creciente, situación que ha incentivado a algunas entidades gubernamentales como las Corporaciones Autónomas Regionales (CVC, 2011) ha tomar como objeto de estudio el deterioro de la calidad de aire como una variable más para el desarrollo de los planes de ordenamiento territorial debido al incremento de las áreas industriales, el desarrollo urbano y algunas prácticas agrícolas que incluyen la quema para sustentar su productividad (PNUMA, 2010).

De acuerdo con estudios epidemiológicos de Bogotá, se encontró que la población más afectada por la contaminación atmosférica son niños y niñas menores de 5 años con problemas de silbidos en el pecho, esta muestra poblacional se encuentra en zonas con mayor exposición frente al 69% de la población total de ciudad (Ministerio10).

Ante esta perspectiva se han generado iniciativas de investigación como la que llevó a cabo Behrentz *et al.* (2006), en la ciudad de Bogotá donde se realizó un inventario de material particulado respirable a través del sondeo a una vía con alta afluencia vehicular y peatonal. La metodología empleada se enfocó en la detección de materia particulada emitida por combustión vehicular, en la que se caracterizó el flujo vehicular a través de aforos realizados en distintos horarios, mientras que en la medición atmosférica se utilizó un fotómetro portátil *DustTrack* con capacidad de filtración de hasta 2  $\mu\text{m}$  que fue ubicado en distintas zonas del tramo seleccionado.

Según los análisis aplicados a los datos recolectados se encontró que el fotómetro portátil tiende a manifestar comportamientos anormales de tipo episodio que pueden ser corregidos si se cuenta con una amplia cantidad de datos de entrada. Además, para el caso de estudio fue importante contar con los datos de aforo vehicular para evaluar si en algunos casos el aparente comportamiento errático de los datos corresponden a un incremento súbito del flujo de vehículos.

El estudio considera dentro de sus argumentos que la importancia de la zona de estudio seleccionada radica en la exposición frecuente que sufren los peatones que transitan por este tramo vial de la ciudad, pues se encontró que los niveles de contaminación exceden las normativas establecidas, razón por la que se han realizado estudios para evaluar la calidad de aire en otras regiones del país donde se tienen indicios de la ocurrencia de eventos que favorecen el deterioro de la calidad de aire.

En Santa Marta Cuao *et al.* (2012), relacionó la tasa de reportes médicos por enfermedades respiratorias en niños de entre 5 y 14 años de edad con los niveles de PM<sub>10</sub> registrados por la actividad carbonífera de la región. El estudio se basó en un análisis exploratorio a la bases de datos de reportes de enfermedades respiratorias de la red de salud básica de la ciudad, y a los registros de contaminación atmosférica emitidos por la corporación regional de Santa Marta. Los resultados indicaron que existe una estrecha relación entre la contaminación atmosférica y las enfermedades respiratorias en la población muestreada.

Esta misma relación se analizó en la ciudad de Santiago de Cali (De la Pava *et al.*, 2008), a través de una modelación matemática que considera variables como población susceptible, población afectada, población total y material particulado. La metodología consiste en la construcción de una matriz Jacobiana creada a partir de ecuaciones diferenciales que conducen a explicar la relación entre los reportes de enfermedades pulmonares con la concentración de PM<sub>10</sub>, donde se encontró que existe una prevalencia cerca del 25% de enfermedades pulmonares a causa de los niveles de contaminación del aire emitidos por el Centro de Diagnóstico Automotriz y el área industrial del departamento que se encuentra en las cercanías de la zona de estudio.

Se concluyó que, 1. existe una relación entre los problemas de salud que sufren poblaciones vulnerables como niños y ancianos, con la contaminación atmosférica; 2. es necesario generar una tendencia de medición e inventario no solo de material particulado sino de todos aquellos compuestos químicos que deterioran la calidad del aire, para ello es prioritario desarrollar e implementar metodologías que den lugar a un monitoreo confiable y extensivo en todas aquellas áreas en las que se tengan indicios de niveles alarmantes de contaminación, o sólo como una forma de prevención y control.

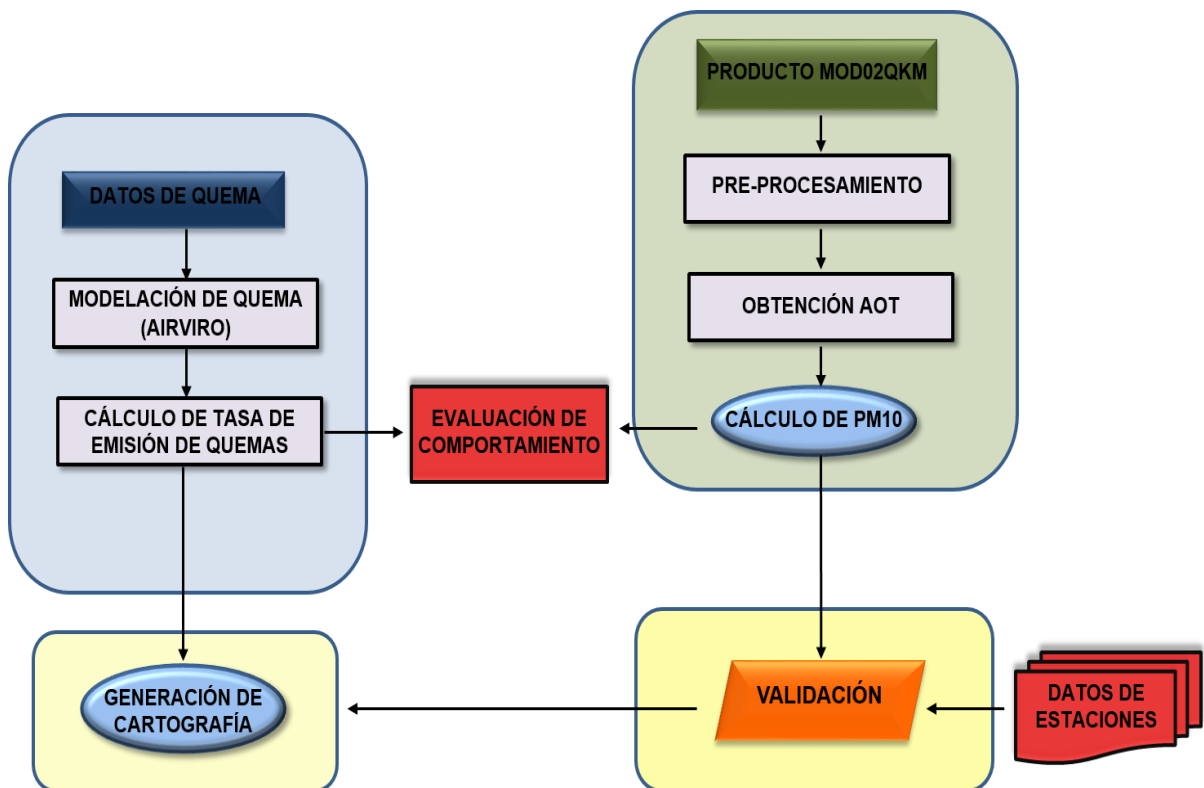
Una opción que se presenta firmemente a nivel mundial para el monitoreo de la calidad del aire son los sensores remotos por su atractivo potencial espacio – temporal, y aunque según los estudios se tiene una alta confiabilidad en la información obtenida es importante destacar que no pueden ser un único medio de medición e inventarios de la contaminación atmosférica, pues aún se encuentra en desarrollo constante al igual que las técnicas que involucran dispositivos mecánicos. La propuesta que plantea esta investigación es generar una sinergia entre ambas metodologías para evitar situaciones de carencia de información como la que presenta Álvarez (2007).

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. MATERIALES

Direccionando los procedimientos aplicados en esta investigación hacia el cumplimiento de los objetivos propuestos, se ha desarrollado una estructura metodológica de acuerdo al orden lógico de los mismos. Una forma adecuada de consolidar dicha estructura es a través de la construcción de un esquema metodológico como el que muestra la Figura 8, en la que se describe la cronología y orden de los procesos.

**Figura 8.** Esquema metodológico



### **6.1.1. Zona de Estudio**

Según Fernández (1998) la gran influencia de la cañicultura en el Valle del Cauca es clara al conocerse que actualmente 33 de sus municipios ubicados en el Valle geográfico del Río Cauca son fuertemente utilizados para el desarrollo de esta práctica, es por esto, que entidades de investigación y gubernamentales han enfocado sus esfuerzos en crear redes de monitoreo tanto de calidad del aire como de variables climatológicas a lo largo de este corredor geográfico.

El área de estudio comprende el sector sur de del Valle geográfico del Río Cauca comprendido principalmente por 21 municipios del Valle del Cauca como se precia en la Figura 9. La temperatura promedio de la zona de estudio fluctúa entre los 23°C y 24°C, correspondiente al piso térmico cálido, la humedad relativa factor de vital importancia para el desarrollo de este proyecto fluctúa en el rango 65%-75%.

Esta es una región denominada intertropical con dos épocas lluviosas y dos secas al año, la primera época seca entre diciembre y febrero, la primera época lluviosa va de marzo a mayo, la segunda época seca de junio a septiembre y la segunda época lluviosa de octubre a noviembre. Los índices de precipitación anual son: 1.589 mm en el norte (133 días de lluvias), 1882 mm al sur (109 días de lluvias) y 938 mm en el centro (100 días de lluvias).

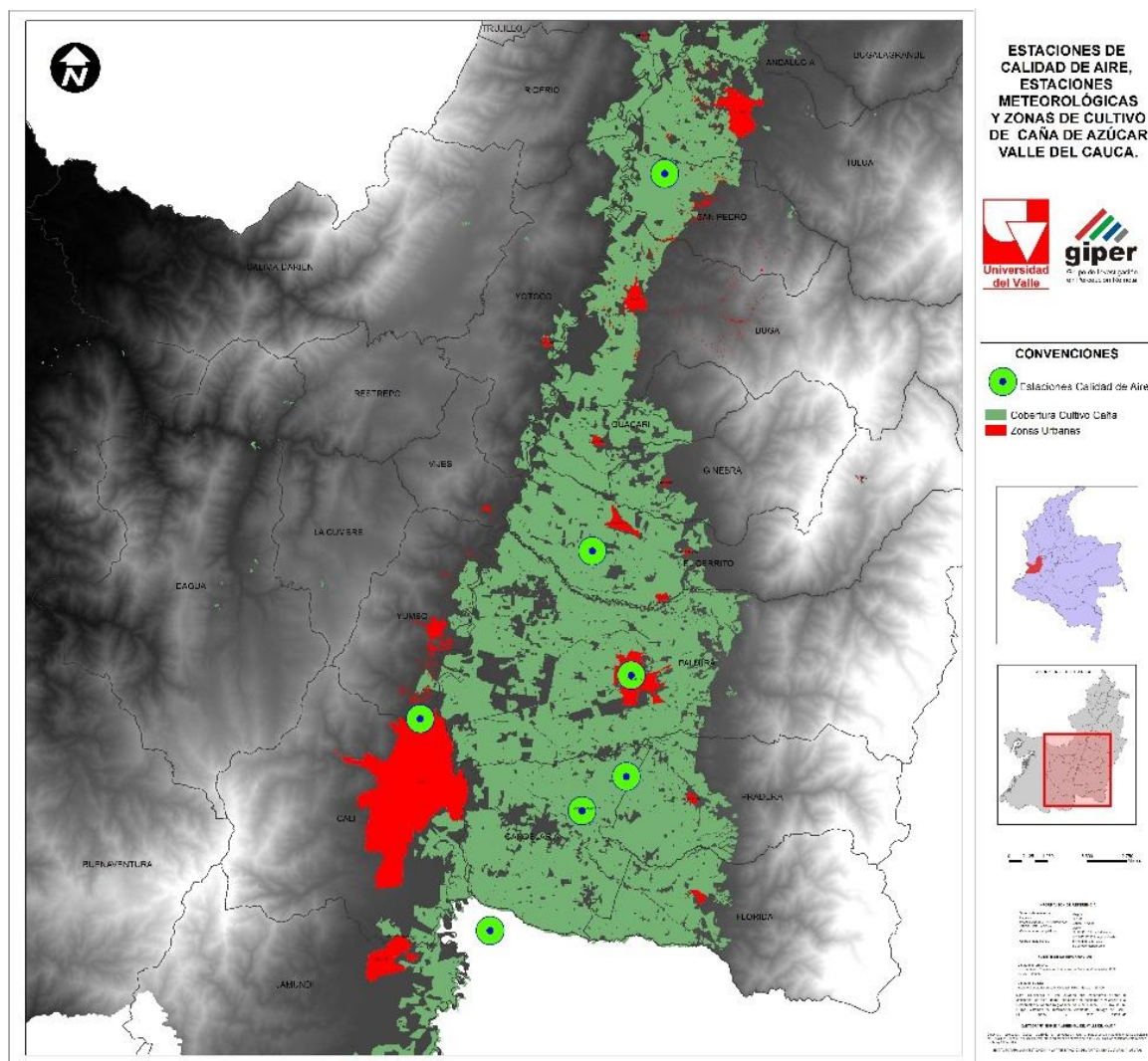
Para efectos de esta investigación se ha seleccionado una fracción de este territorio el cual se encuentra delimitado al Noroeste por las coordenadas geográficas N: 4,3381, W: 76,9793 y al sureste con las coordenadas geográficas N: 2,9985, W: 75,5771.

### **6.1.2. Obtención de la Información**

Planteando un orden lógico para los procesos ejecutados, inicialmente se definió los periodos a evaluar, la consideración inicial es desarrollar estudios multitemporales para los años 2011 y 2012. Posteriormente, es necesarios definir la fuente de información a utilizar, dentro de esta categoría se encuentran las imágenes MODIS, los datos de estaciones de calidad de aire, datos de estaciones meteorológicas y datos de quema de caña de azúcar entre los que se encuentra su distribución espacial presentada en la Figura 9.



**Figura 9.** Ubicación de zonas de cultivo de caña y estaciones de calidad de aire.



Para el desarrollo de la metodología se utilizó el producto MOD02 del cual se emplearon las bandas de reflectancia 1, 3, y 4 centradas en longitudes de onda (0,47, 0,55 y 0,66 respectivamente). Para obtener estas imágenes fue necesario visitar el sitio web de la NASA LAADS WEB <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>, y es en este proceso donde la consideración inicial de los periodos de estudio toma forma y según condiciones de nubosidad, disponibilidad de imágenes y condiciones de datos para

validación se determinan días particulares para la descarga de las imágenes, se utilizaron como mínimo cuatro imágenes mensuales pues el material particulado no se sedimenta en periodos cortos sino que permanece suspendido en el aire a causa de su tamaño y densidad (MAVDT, 2010).

En la Tabla 4, se presentan los días que cumplieron con las condiciones mencionadas anteriormente, y la correspondiente hora de captura de las imágenes.

**Tabla 4.** Relación cronológica de imágenes descargadas.

Imágenes Utilizadas para el Año 2011				Imágenes Utilizadas para el Año 2012		
Mes	Día Juliano	Hora		Mes	Día Juliano	Hora
Enero	2	16:10		Enero	1	14:55
Enero	6	15:45		Enero	7	16:00
Enero	11	16:05		Enero	9	15:45
Enero	15	15:40		Enero	16	15:50
Enero	22	15:45		Enero	25	15:45
Enero	27	16:05		Enero	27	15:35
Febrero	51	15:15		Febrero	32	15:50
Febrero	56	15:35		Febrero	33	14:55
Febrero	59	16:05		Febrero	45	15:20
Marzo	63	15:40		Febrero	46	16:05
Marzo	70	15:45		Febrero	48	15:50
Marzo	74	15:20		Marzo	64	15:50
Marzo	86	15:45		Marzo	68	15:30
Abril	91	16:05		Marzo	71	16:00
Abril	104	15:35		Marzo	73	15:45
Abril	111	15:40		Marzo	75	15:35
Abril	116	16:00		Abril	93	15:20
Abril	120	15:35		Abril	114	15:40
Mayo	122	15:20		Abril	116	15:30
Mayo	130	16:10		Abril	121	15:45
Mayo	140	15:10		Mayo	123	15:35
Mayo	143	15:50		Mayo	139	15:35
Mayo	150	15:45		Mayo	150	15:15

Se utilizaron un total de 46 días de estudio los que representan el procesamiento de 138 bandas espectrales. Un aspecto influyente en la selección definitiva para estos períodos de tiempo fue la relación entre la concentración de PM<sub>10</sub> y la variabilidad climática de la zona de estudio, pues según estudios revisados (Wang et al., 2010(b); Can et al., 2011; Emili et al., 2010) se sugiere una relación entre estos fenómenos.

Para la descarga de las imágenes seleccionadas del servidor de la NASA se utilizó la herramienta Wget. Los productos de la descarga se encuentran en formato HDF-EOS2 que es un formato estándar desarrollado por la NASA con el fin poner a disposición del usuario una herramienta que pueda ser manipulada en cualquier tipo de sistema operativo.

## 6.2. PRE-PROCESAMIENTO

### 6.2.1. Georreferenciación

El proceso de georreferenciación se realiza a través de la herramienta MRT – Swath (MODIS Reprojection Tool Swath), consiste en vincular las imágenes a un sistema de referencia que para la zona de estudio es MAGNA-SIRGAS WGS84, sin embargo, se han georreferenciado en coordenadas de tipo elipsoidal por lo que basta con estar vinculadas al geoide WGS84. Para lograr usar el aplicativo MRT – Swath, es necesario descargar también el producto MOD03, el cual es el geolocalizador dispuesto por la NASA para este fin, esta descarga debe coincidir con el día y hora de captura del producto MOD02.

### 6.2.2. Corrección Radiométrica

Para iniciar el tratamiento de las imágenes es necesario llevar a cabo una corrección a las bandas utilizadas en la que se debe relacionar la información captada con las características físicas de la superficie, esto con el fin de eliminar las distorsiones provocadas por la interacción entre la radiación solar y la atmosfera en el momento de la captura (Chander, 2009). Con las imágenes debidamente georreferenciadas es posible observar que los datos se encuentran reescalados entre 0 – 32767 valores digitales, para obtener las magnitudes físicas de radiancia en unidades de  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$  se debe aplicar la Ecuación (20) que se expresa de la siguiente manera (MODIS User's Guide, 2003):

$$L_{\lambda sat} = G_{\lambda} * (ND - B_{\lambda}) \quad (20)$$

Donde ND son los niveles digitales de la imagen (Bandas Utilizadas) que se encuentran en el intervalo de 0 – 32767,  $G_{\lambda}$  es el factor de ganancia para cada banda y  $B_{\lambda}$  es el factor de pérdida.

### 6.2.3. Corrección de Efectos Atmosféricos

Ya que el producto MOD02 pertenecen al Nivel 1B de MODIS, no es necesario realizarle corrección atmosférica puesto que los valores de reflectancia de este producto vienen corregidos por vapor de agua, ozono y dióxido de carbono (Levy et al, 2007). Para el producto MOD02 del MODIS, no fue necesaria realizar la obtención del TOA (Tope de la atmosfera, reflectancia en las longitudes de onda correspondientes a 0,65 $\mu m$  y 2,1 $\mu m$ ) (Wang, 2010(a)), pues estas imágenes se encuentran en valores de reflectividad del flujo del espectro solar de la parte superior de la atmósfera (Remer et al, 2005).

---

<sup>2</sup> Hierarchical Data Format – Earth Observing System

#### 6.2.4. Recorte de la Zona de Estudio

Luego de tener las imágenes debidamente georreferenciadas es necesario llevar a cabo un recorte de la imagen que abarque estrictamente la zona de estudio. Este proceso es necesario debido a que la Ecuación (1) orienta el procedimiento según la posición del sol con respecto al momento de captura de la imagen, por consiguiente, si este proceso no se ejecuta antes de dar inicio al procesamiento de las imágenes se provoca una distorsión en los resultados obtenidos.

Dado que el recorte de zona de estudio es un proceso que se debe aplicar para cada banda de las imágenes a usar, se ejecuta la función "ExtractByMask" del software ArcGis 9.3, que extrae una porción de la imagen a través de la intersección con otro raster en una posición definida por el usuario, y como se presenta en la Figura 10, con el fin de agilizar este proceso, se tomó como base el código fuente de dicha función y se desarrolló un script usando el mismo lenguaje de la plataforma ArcGis, Python, donde se definieron ciclos para agilizar el proceso de manera en que el script se enruta en un fichero que contiene cada una de las bandas a recortar, ejecuta el proceso y los resultados se enrutan nuevamente en una carpeta de salida, donde cada archivo es nombrado según las especificaciones dispuestas para el script. Entonces con el uso de esta herramienta informática para recortar las imágenes, un proceso que manualmente podría tardar hasta medio día según las capacidades técnicas de la maquina utilizada, se ha reducido a cuestión de un par de minutos puesto que todo se realiza de forma automática y rápida debido a las bondades del lenguaje Python.

**Figura 10.** Código fuente del proceso "ExtractByMask" para recorte de raster

```
Script example
# ExtractByMask_sample.py
# Description:
#   Extracts the cells of a raster that correspond with the areas
#   defined by a mask.
# Requirements: None
# Author: ESRI
# Date: Sept 6, 2005

# Import system modules
import arcgisscripting

# Create the Geoprocessor object
gp = arcgisscripting.create()

try:
    # Set local variables
    InRaster = "C:/data/raster1"
    InMask = "C:/data/raster2"
    OutRaster = "C:/data/final_1"

    # Check out Spatial Analyst extension license
    gp.CheckOutExtension("Spatial")

    # Process: ExtractByMask
    gp.ExtractByMask_sa(InRaster, InMask, OutRaster)
except:
    # If an error occurred while running a tool, then print the messages.
    print gp.GetMessages()
```

**Fuente:** Software ArcGis 9.3

## **6.3. PROCESAMIENTO**

### **6.3.1. Reflectancia de Superficie**

Como se describió en el planteamiento teórico de este documento, la reflectividad generada por la superficie planetaria representa un rol importante dentro del marco del proceso metodológico aplicado a esta investigación, pues la variabilidad de coberturas terrestres y su interacción con la atmósfera tienen influencia sobre la energía radiante que es captada por el sensor. Por consiguiente, esta sección detalla los procedimientos aplicados para obtener esta reflectividad, por ello, para comprender la operatividad de estos procesos se ha construido un esquema metodológico representado por la Figura 11 funcionando como soporte de entendimiento para este proceso.

#### **6.3.1.1. Cálculo del Ángulo de Dispersión de la Luz**

El procedimiento inicial para el cálculo de las variables contempladas en el planteamiento teórico se refiere a orientar la imagen con respecto a la posición del sol y la posición del sensor en el momento de la captura. La Ecuación (1) es aplicada para obtener el ángulo existente entre el punto central de la imagen y el sol en el momento de captura, relación importante puesto que va a definir la orientación de los haces de luz incidentes respecto a la zona captada; esta relación se denomina ángulo cenital solar. Ahora bien, en proceso a parte, la Ecuación (4) describe de forma similar el ángulo existente entre el punto central de la imagen con respecto a la posición del satélite, este ángulo se denomina ángulo cenital del sensor.

Partiendo del hecho de que las partículas estudiadas tienen propiedades capaces de absorber o dispersar la energía solar, es necesario obtener la variación que sufre la dirección de la luz, para ello se utilizó la Ecuación (7), la cual define el nuevo direccionamiento que sufre el haz de luz al momento de la colisión con las partículas, este redireccionamiento es denotado por el ángulo de dispersión de luz, que requiere de la estructura geométrica solar y del sensor en el momento de la captura de la imagen. La Ecuación (7) se alimenta entonces de las geometrías denotadas por las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5) y (6); que definen el ángulo cenital solar, ángulo azimutal solar, ángulo cenital del sensor y ángulo azimutal del sensor, respectivamente.

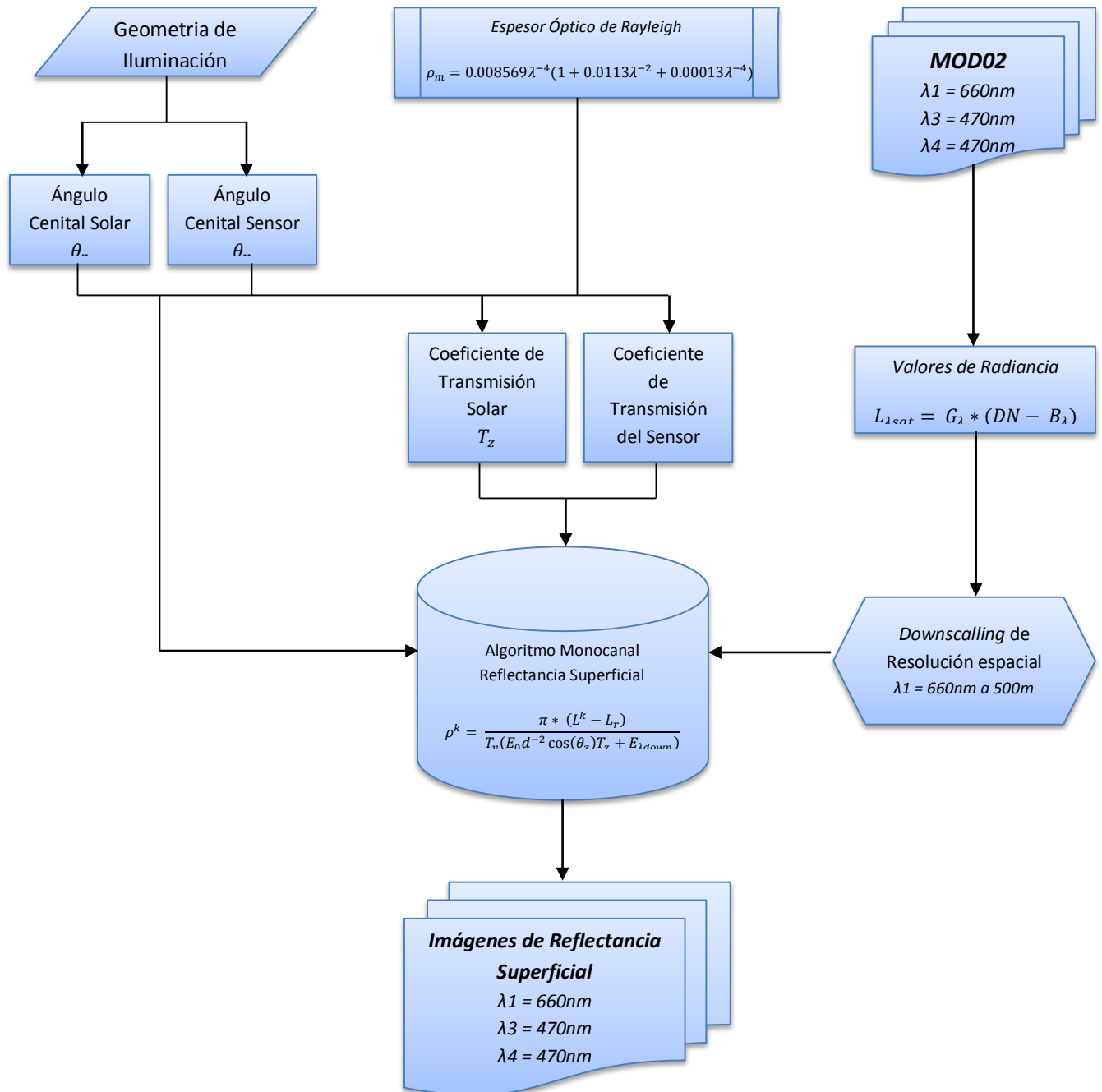
#### **6.3.1.2. Cálculo de la Función Fase de Dispersión**

Teniendo entonces el nuevo direccionamiento que sufre la luz incidente, se requiere también de su nuevo patrón de direccionamiento, ya que dependiendo de la intensidad y posición con la que se produzca el choque con la partícula, las propiedades del movimiento van a variar en una dirección definida por la Ecuación (7). Por consiguiente, la Ecuación (9), que denota la función fase de dispersión, es utilizada para modelar dicho fenómeno de movimiento.

### 6.3.1.3. CÁLCULO DE LA REFLECTANCIA SUPERFICIAL

De momento, se han definido los procesos necesarios para obtener la estructura geométrica que se requiere en el análisis de la orientación y el patrón de dirección de la luz dispersada por las partículas, sin embargo, no toda la energía irradiada por el sol colisiona con las partículas, de hecho, la mayor parte sigue su rumbo normal hasta la superficie terrestre. Con el uso de cada una de las

**Figura 11.** Esquema Metodológico para la obtención de la Reflectancia Superficial



Bandas, la Ecuación (10) define la reflectancia producida por la superficie terrestre, la que se traduce en la energía que ha sido reflejada por la superficie y que es captada por el sensor. Esta es necesaria ya que para cuantificar la reflectancia producida por las partículas se debe descontar del proceso, la energía que es reflejada por la superficie de la tierra para obtener tan solo el residuo atmosférico. Las Ecuaciones (11) y (12) permiten reducir aquellos efectos producidos por factores atmosféricos diferentes de los generados por las partículas, por ello, estas alimentan el modelo de reflectancia de superficie.

### 6.3.2. Espesor Óptico de Aerosoles

Para obtener una buena aproximación de la concentración de PM<sub>10</sub> es debido analizar las propiedades ópticas de los aerosoles en la zona de estudio correspondiente. En este caso de estudio, se han empleados dos puntos importantes de dichas propiedades que son el Albedo de Dispersión Simple y el Espesor Óptico de Aerosoles (Esteve, 2011). Esta sección explica los procedimientos que presumen la utilidad de dichas propiedades, con el apoyo de un esquema metodológico representado mediante la Figura 12 el cual da un soporte para el entendimiento del proceso.

#### 6.3.2.1. Cálculo del Albedo de Dispersión Simple ( $\omega_0$ )

Una vez realizados los procesos para la obtención de las geometrías que intervienen en la captura de la imagen, se requiere del uso particular de teorías desarrolladas en función de los aerosoles. Partiendo de la idea de que los aerosoles se encuentran distribuidos en el aire, una de las propiedades que explican la dinámica de estos elementos se basa en su cualidad de absorber o dispersar energía en este medio. El albedo de dispersión explica la relación entre el tamaño de la longitud de onda de la energía solar y la partícula, pues contribuciones de energía con longitudes de onda relativamente bajas son propensas a ser dispersadas por partículas de mayor tamaño (García, 2010; Esteve, 2010; Kaufman & Tanré, 1998). Denotado por la Ecuación (13), es utilizado para definir si predominan partículas con capacidades de absorción o dispersión para una zona particular.

La absorción es una pérdida de energía del campo electromagnético producida por la interacción con otro cuerpo capaz de transformar una fracción de la energía incidente en otro tipo de energía. Para cuantificar ésta pérdida se debe calcular la sección eficaz de absorción en el aire en una longitud de onda efectiva, para ello se emplea la ecuación (21) que explica la relación entre la energía incidente sobre una superficie (en este caso el aire) que contiene una densidad de cuerpos absorbentes en todo su espesor (Blesa et al., 2005).

$$\sigma_a = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{(\rho * l)} \quad (21)$$

Donde  $I$  es la radiación transmitida,  $I_0$  es la radiación incidente,  $\rho$  es la densidad molecular y  $l$  es el espesor de la capa del aire.



Por otra parte, la dispersión no supone una alteración en la intensidad de la energía con la que este caso interactúan las partículas sino una atenuación en una longitud de onda efectiva y en una sección eficaz de dispersión apropiada. La ecuación (22) expresa la sección eficaz de dispersión en el aire (Blesa et al., 2005).

$$\sigma_d = \frac{3,9 \cdot 10^{28}}{\lambda^x} \quad (22)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda efectiva en la que se desea obtener la sección eficaz de dispersión y  $x$  es una variable que se expresa mediante la ecuación (23).

$$x = 3,916 + 0,074\lambda + \frac{0,05}{\lambda} \quad (23)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda efectiva en la que se desea obtener la sección eficaz de dispersión.

#### **6.3.2.2. Cálculo de la Reflectividad Aparente**

Antes de calcular el AOT, es necesario convertir los valores digitales expresados en tonos de grises de las bandas utilizadas, a valores de reflectividad planetaria o reflectividad aparente, la cual se encuentra denotada por la Ecuación (15) e indica los valores de energía total que son captados por el sensor luego de que esta es emitida por el sol y ha tenido interacción con todas las cubiertas en su paso por la tierra, por ello, de esta variable se sustraen los residuos atmosféricos según el modelamiento de AOT.

#### **6.3.2.3. Cálculo del Espesor Óptico de Aerosoles (AOT)**

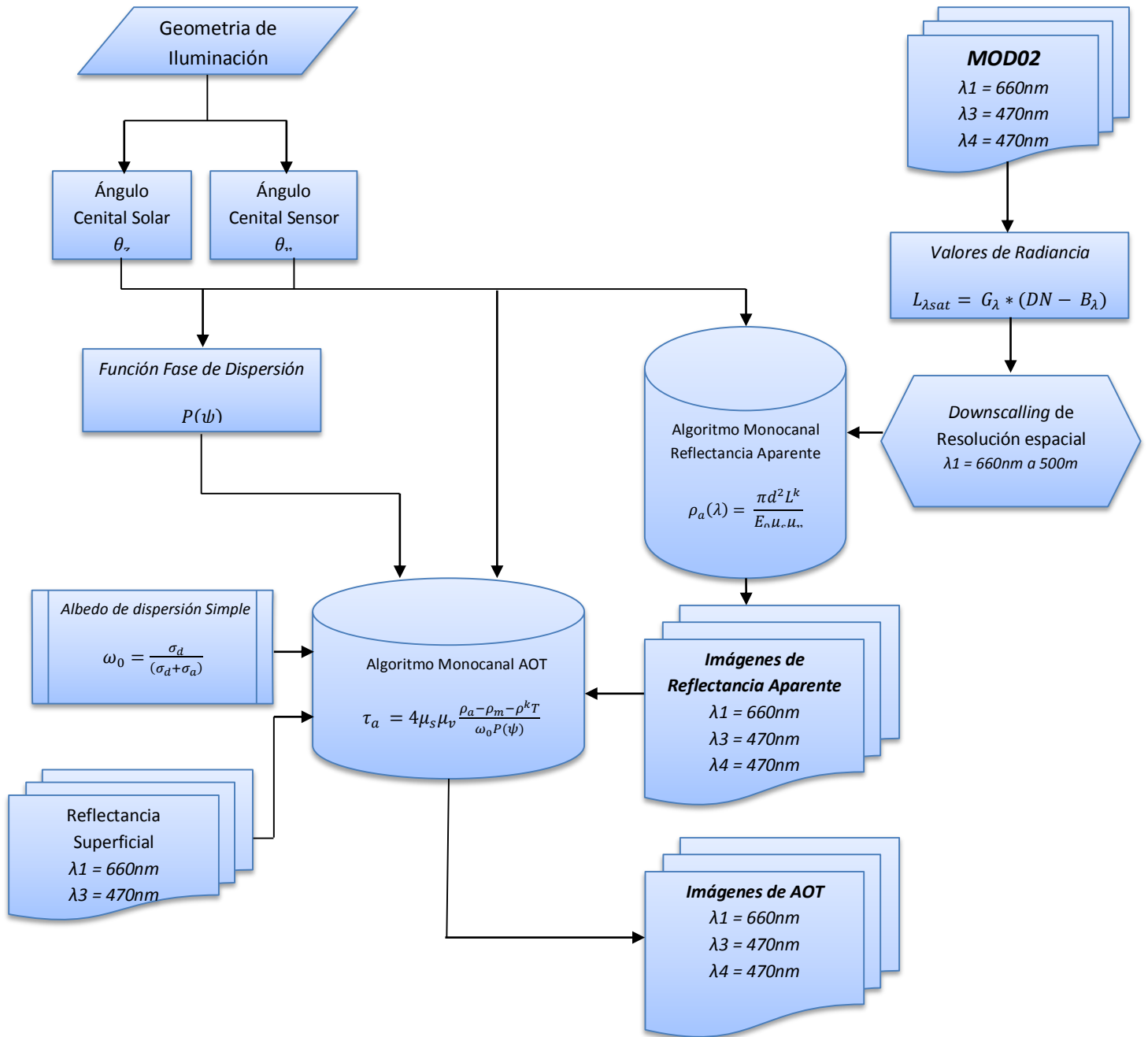
Para cuantificar la concentración de PM<sub>10</sub>, es usada la Ecuación (14), la cual denota el “Espesor Óptico de Aerosoles, AOT”, pues mediante esta propiedad óptica de los aerosoles se lleva a cabo una distribución espacial de estos según su tamaño a través de la caracterización entre partículas finas y partículas gruesas, por ello la importancia de aplicar la Ecuación (15) pues si se tiene una zona donde predomina la absorción hay mayor probabilidades de lograr cuantificar concentraciones de PM<sub>10</sub>.

#### **6.3.3. Cálculo de PM<sub>10</sub>**

Luego de estudiar el Espesor Óptico de Aerosoles sobre la zona de estudio es posible estimar la concentración de PM<sub>10</sub> existente. Ya que el AOT es la carga total de todos los aerosoles sobre la columna atmosférica, para discernir este aerosol en particular es necesario aplicar una metodología propia para este caso, la cual se describirá en este segmento del documento. Para entender de una forma más clara la Figura 13 muestra un esquema metodológico que explica los procedimientos realizados.



**Figura 12.** Esquema Metodológico para la obtención de AOT



#### **6.3.3.1. Cálculo de la Dispersión de MIE**

Para lograr una modelación adecuada de las propiedades ópticas de los aerosoles, es posible observar que se llevaron a cabo procesos con una secuencia lógica donde el siguiente depende del anterior. Para concluir este ciclo, y encontrar la cantidad de energía total que ha interactuado única y exclusivamente con aerosoles se utiliza la Ecuación (16), la cual expresa la cantidad de energía reflejada por unidad de área que dispersan los aerosoles y que es captada por el sensor, pero, dicha reflexión de energía puede verse afectada por la interferencia de energía provenientes de otras fuentes, como puede ser la vegetación, el agua o el suelo, por ejemplo.

#### **6.3.3.2. Corrección del Camino de la Energía Irrradiada por los Aerosoles**

Una forma de corregir este efecto adverso para los fines de este estudio, se lleva a cabo con la corrección del camino de energía irradiada por los aerosoles según la Ecuación (17), la cual representa la reflectividad atmosférica producida por todos los aerosoles suspendidos en el aire. Cabe mencionar que los productos resultantes de la Ecuación (17) y la ecuación (18), son obtenidos a partir del procesamiento de nuevos scripts implementados nuevamente en la plataforma python.

Así, se ha obtenido el residuo de la interacción con la cubierta atmosférica, más propiamente con los aerosoles; pese a esto, aún no se tiene si quiera un indicio que permita discriminar la presencia explícita de PM<sub>10</sub>, por ello, la Ecuación (18) permite determinar la concentración de PM<sub>10</sub> a partir de una relación entre el producto de la reflectividad atmosférica y un coeficiente obtenido de manera empírica según Othman et al. (2010). El coeficiente se obtiene a partir de la regresión lineal entre el producto tipo raster de la reflectividad aparente y el límite permisible de la normativa definida.

#### **6.3.3.3. Cálculo de los Coeficientes Empíricos y PM<sub>10</sub>**

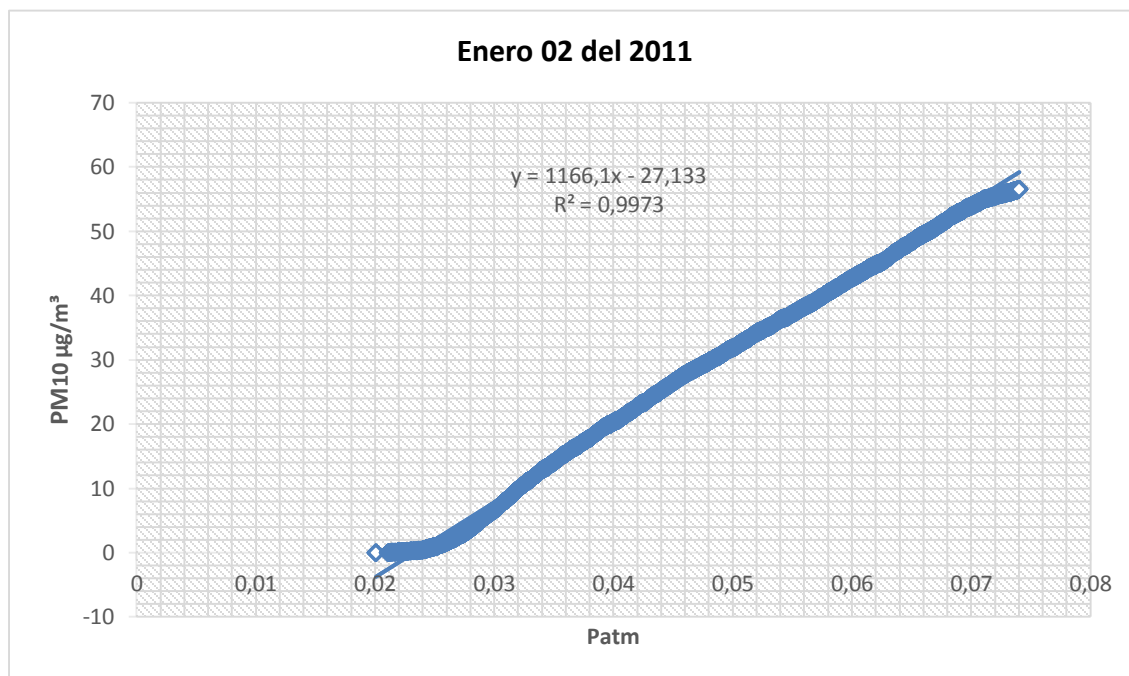
Según la Ecuación (18), cada banda utilizada genera una contribución propia para determinar la concentración de PM<sub>10</sub>, además se relaciona con un coeficiente que resulta de aplicar una regresión lineal simple con la el límite permisible para la calidad de aire en la zona de estudio. Para calcular los coeficientes empíricos de la ecuación (18) inicialmente se tomó cada banda de reflectividad atmosférica obtenida, que luego del recorte de la zona de estudio tiene un total de 23.707 píxeles, y convertir cada una a formato *ASCII*<sup>3</sup>, esto con el fin de correlacionar todos estos píxeles con la normatividad que determina la EPA (1990) que para este caso se aplicará un límite de 150µg/m<sup>3</sup> debido a que es el límite permisible diario que se ha adoptado para la región. Para llevar a cabo la regresión lineal se desarrolló a través del código fuente de Excel, Visual Basic (Ver Anexo A), una macro capaz de

---

<sup>3</sup> American Standard Code for Information Interchange

organizar todos los elementos en una única columna y de esta manera lograr hacer dicho proceso de una forma más ágil, este proceso debe llevarse a cabo para cada una de las bandas de las 46 imágenes estudiadas. La Figura 14 muestra un ejemplo de los resultados que se obtienen de aplicar estas regresiones, el Anexo B muestra el resultado de todas las regresiones aplicadas.

**Figura 13.** Regresión lineal simple entre límite permisible de PM10 y la reflectividad atmosférica de  $\lambda_1 = 660\text{nm}$  para el día 02 de Enero del 2011.

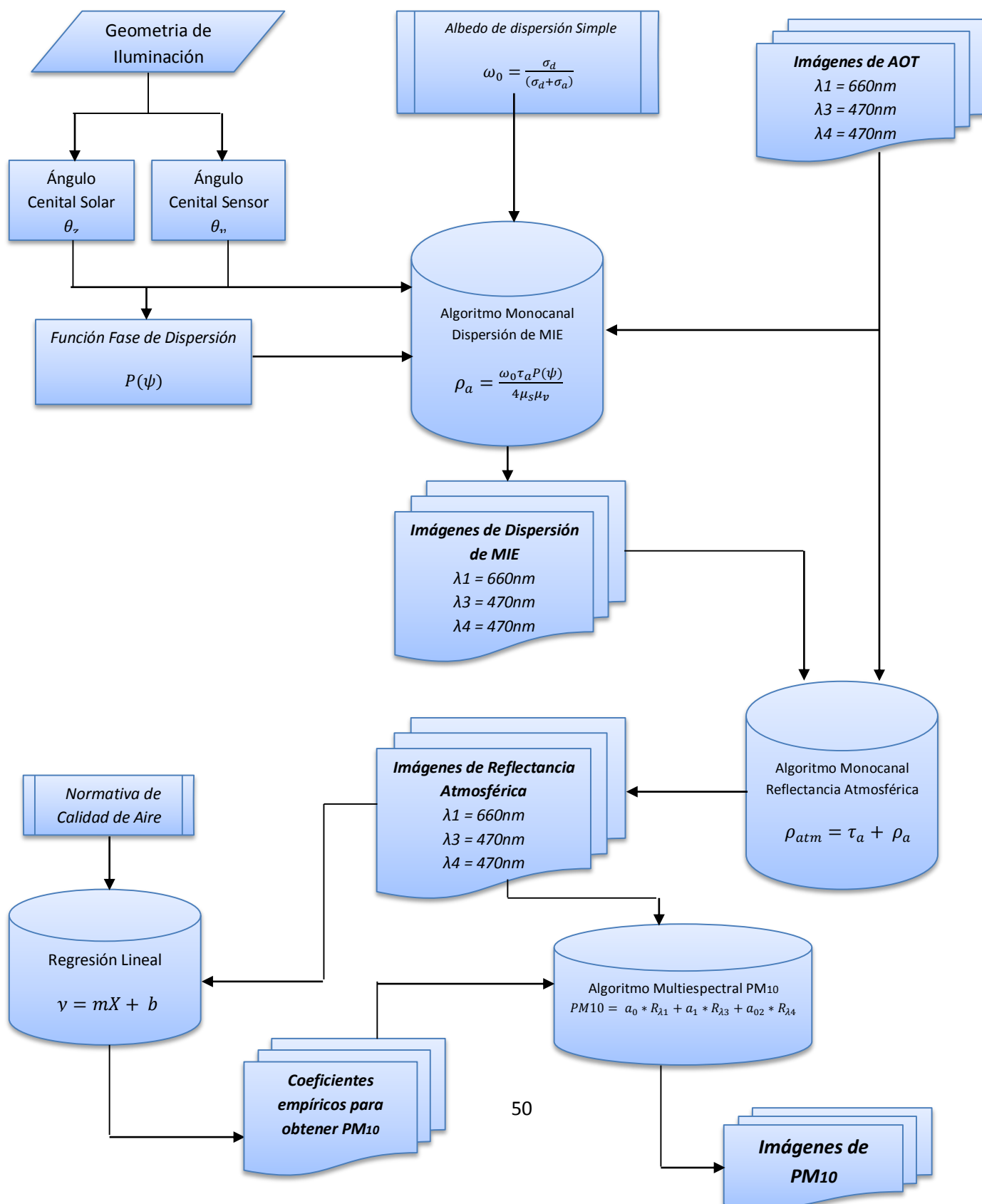


De las ecuaciones lineales generadas con las regresiones, las pendientes serán los coeficientes empíricos con los que para cada imagen, y con sus respectivas bandas de reflectividad, se desarrolló una ecuación particular siguiendo la composición teórica de la ecuación (19), con la que finalmente es posible determinar la concentración de PM10 para la zona de estudio (Ver Anexo C).

#### 6.4. VALIDACIÓN

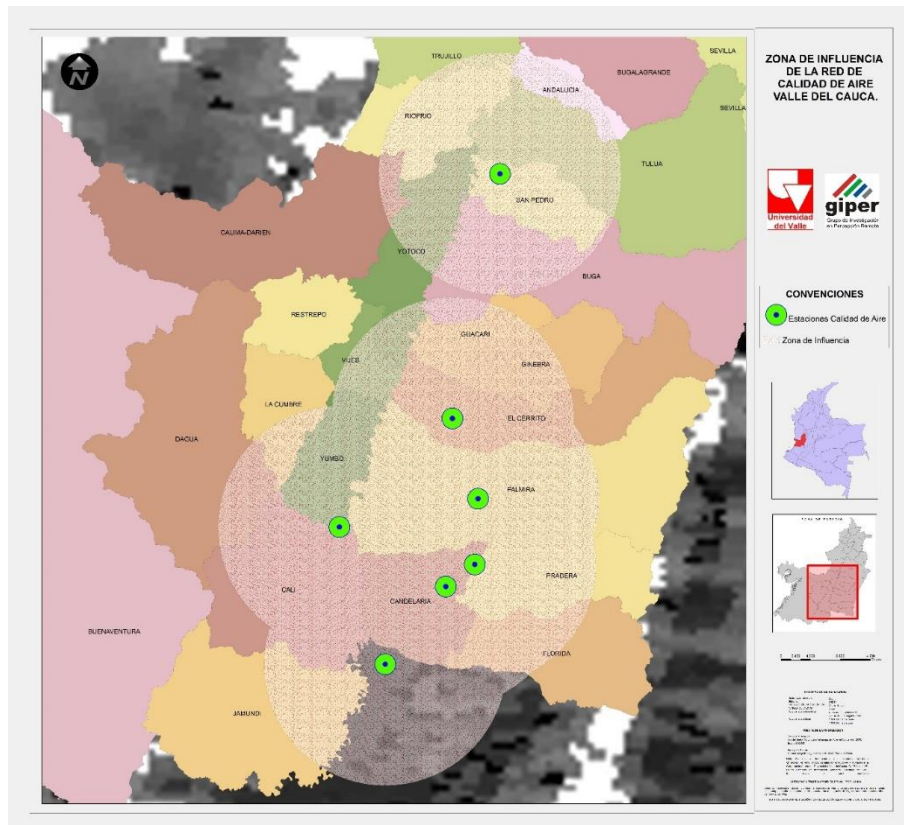
Concluyendo la fase metodológica de teledetección espacial, para determinar concentración de PM10, es necesario verificar si los resultados obtenidos corresponden a la realidad, la forma de hacerlo es llevando a cabo una correlación lineal con datos de estaciones meteorológicas, otorgados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC.

**Figura 14.** Esquema Metodológico para la obtención de PM10



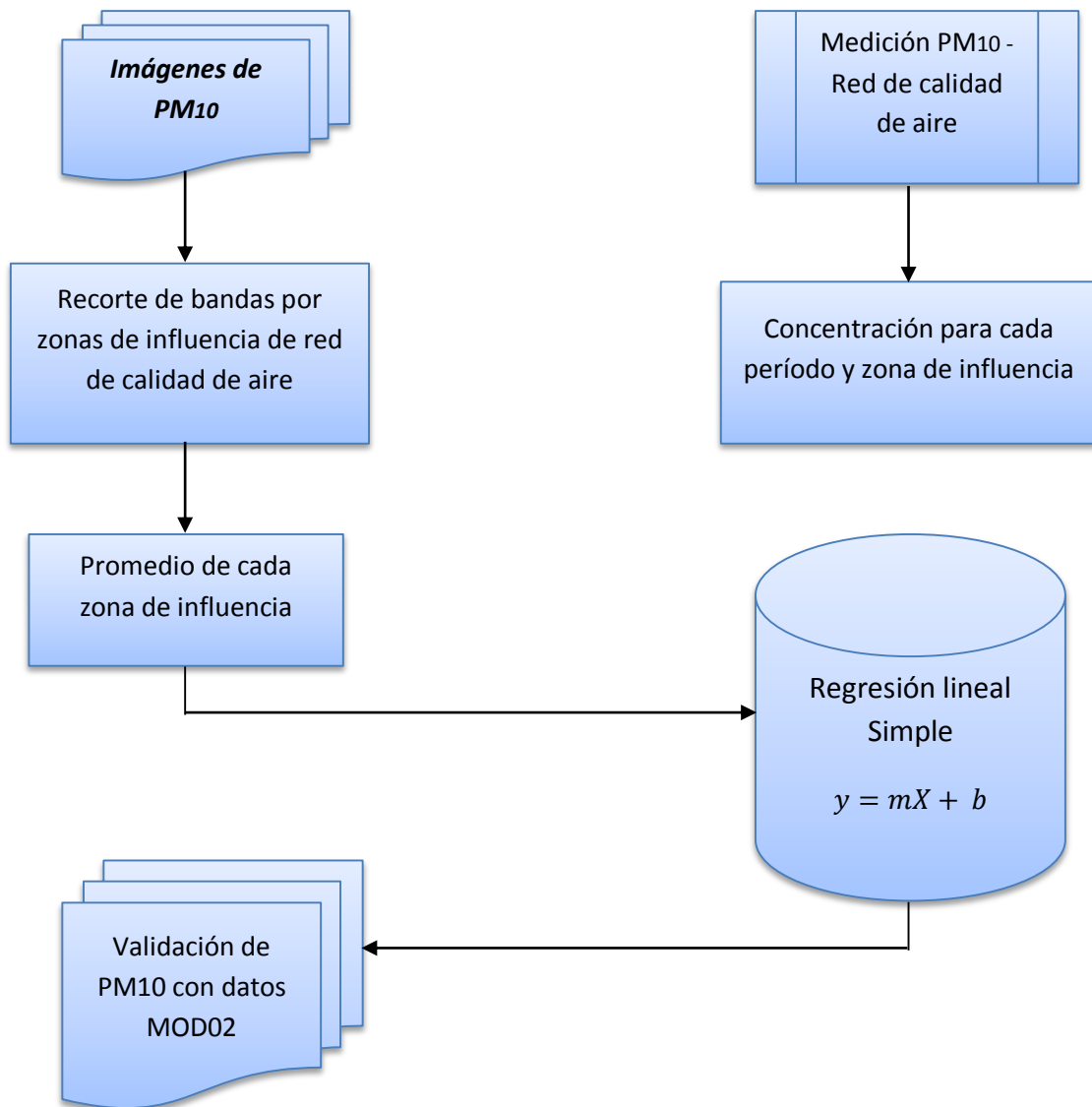
En la Tabla 6 se presenta la ubicación geográfica de las estaciones utilizadas por la red de calidad de aire de la CVC. Según el “MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE” desarrollado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en el año 2010, se clasifican las estaciones en campo como se indica en la Tabla 5. Ahora bien, la muestra de datos de las imágenes se definió según las indicaciones del manual mencionado, tomando como centro el punto representado por las coordenadas de la Tabla 6 para cada estación, en el caso de las estaciones urbanas y rurales, se generó una zona de influencia –Buffer- con un radio de 20Km, así como lo muestra la Figura 15; con estos nuevos elementos elaborados para cada día del análisis realizado, se extrajo un recorte definido por las coordenadas límites de los buffers de cada una de las estaciones. Los subconjuntos obtenidos con dicha extracción fueron migrados a formato ASCII y procesados en Excel, del paquete Microsoft Office, para seleccionar datos libres de nubosidad, y de esta forma realizar un promedio de cada nuevo subconjunto para ser comparado con el dato arrojado por la estación de calidad de aire, puesto que cada dato de la estación no es más que una interpolación de información delimitada por el alcance definido por la Tabla 5 según Aguado et al. (2000).

**Figura 15.** Distribución geográfica de las estaciones de calidad de aire con sus respectivas zonas de influencia con Radio de 20Km, caso de estudio.



Para dar mayor claridad al proceso realizado en la sección 6.4, la Figura 16 representa un esquema metodológico que se estructura con los procesos necesarios para alcanzar la validación de los datos generados con las imágenes MODIS a partir de los datos medidos por la red de calidad de aire.

**Figura 16.** Esquema Metodológico para la validación de PM<sub>10</sub>



**Tabla 5.** Escalas de Monitoreo del SVCA

ESCALA	DESCRIPCIÓN	ESCALA
<b>MICRO</b>	Típica de áreas como cañones urbanos y corredores de tráfico donde el público puede estar expuesto a altas concentraciones de contaminantes provenientes de las emisiones de fuentes móviles o fuentes puntuales. Responde a estudios puntuales de un grupo de fuentes y receptores específicos y/o estudios epidemiológicos. Las mediciones tomadas a esta escala no deben tomarse como representativas de un área mayor.	<b>2 m – 100 m</b>
<b>MEDIA</b>	Representa concentraciones típicas de zonas limitadas en un área urbana.	<b>100 m – 0.5 Km</b>
<b>VECINDARIO</b>	Las mediciones en esta categoría pueden representar las condiciones en un área específica al interior de un área urbana.	<b>0.5 Km – 3 Km</b>
<b>URBANA</b>	Condiciones de un área urbana.	<b>3 Km – 20 Km</b>
<b>REGIONAL</b>	Áreas rurales o conjunto de áreas urbanas y rurales. Incluye la interacción de varias jurisdicciones de diferentes autoridades ambientales.	<b>Más de 20 Km hasta el área total de la jurisdicción.</b>
<b>NACIONAL</b>	Estudio del país. Incluye la integración de varios SVCA y jurisdicciones de diferentes autoridades ambientales.	<b>Todo el país.</b>

**Fuente:** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

**Tabla 6.** Ubicación geográfica de las estaciones de la red de calidad de aire del Valle del Cauca

RED DE CALIDAD DE AIRE - CVC	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>Oeste</i>	<i>Sur</i>
<b><i>Tuluá</i></b>	4,209	-76,086	-76,450	3,840
<b><i>Cerrito</i></b>	3,840	-76,157	-76,521	3,475
<b><i>Palmira</i></b>	3,696	-76,115	-76,452	3,392
<b><i>ACOPI</i></b>	3,681	-76,330	-76,693	3,322
<b><i>Candelaria Rural</i></b>	3,603	-76,120	-76,497	3,260
<b><i>Candelaria Urbana</i></b>	3,579	-76,176	-76,536	3,231
<b><i>Puerto Tejada</i></b>	3,476	-76,255	-76,623	3,108

**Fuente:** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC

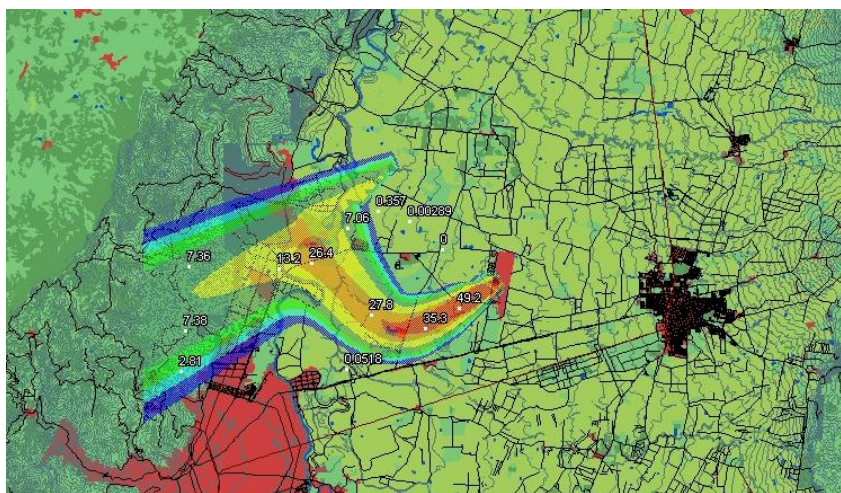


## 6.5. Modelación de Quemas de Caña Mediante la AIRVIRO

Con la validación de los datos PM<sub>10</sub> obtenidos de los procesos aplicados a las imágenes MODIS, se procede a evaluar la influencia de la quema de biomasa, en este caso por quema de caña de azúcar, en las emisiones de PM<sub>10</sub>. El modelamiento atmosférico constituye uno de los principales mecanismos para el monitoreo y control de partículas en suspensión, el software AIRVIRO es un sistema de calidad de aire conectado a redes de información meteorológica y de calidad del aire que permite el manejo de información ambiental como datos meteorológicos, calidad del aire, emisiones antropogénicas, emisiones naturales por medio de un usuario web, para el caso específico de este proyecto fue utilizado un usuario y base de datos creada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

Por medio del módulo '*Dispersión*' del software AIRVIRO, que contiene un modelo Gaussiano de dispersión de múltiples fuentes, fueron creadas algunas simulaciones sobre el comportamiento de las tasas de emisión de PM<sub>10</sub> generado por quemas de caña específicas en el Valle del Cauca, con el fin de identificar si aporta incrementos significativos al total de PM<sub>10</sub> encontrado con las imágenes satelitales, como se enseña en la Figura 17, para esto fue necesario tanto la base de datos meteorológica ya integrada al sistema por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, como información puntual que permitieran al Software un modelamiento más cercano a la realidad del evento de quema. Como lo muestra la Tabla 7 y la Tabla 8, datos como hora de la quema (Inicio – Final), ubicación, área quemada y dirección del viento a la hora del evento fueron necesarios.

**Figura 18.** Modelos de dispersión -



**Fuente:** AIRVIRO

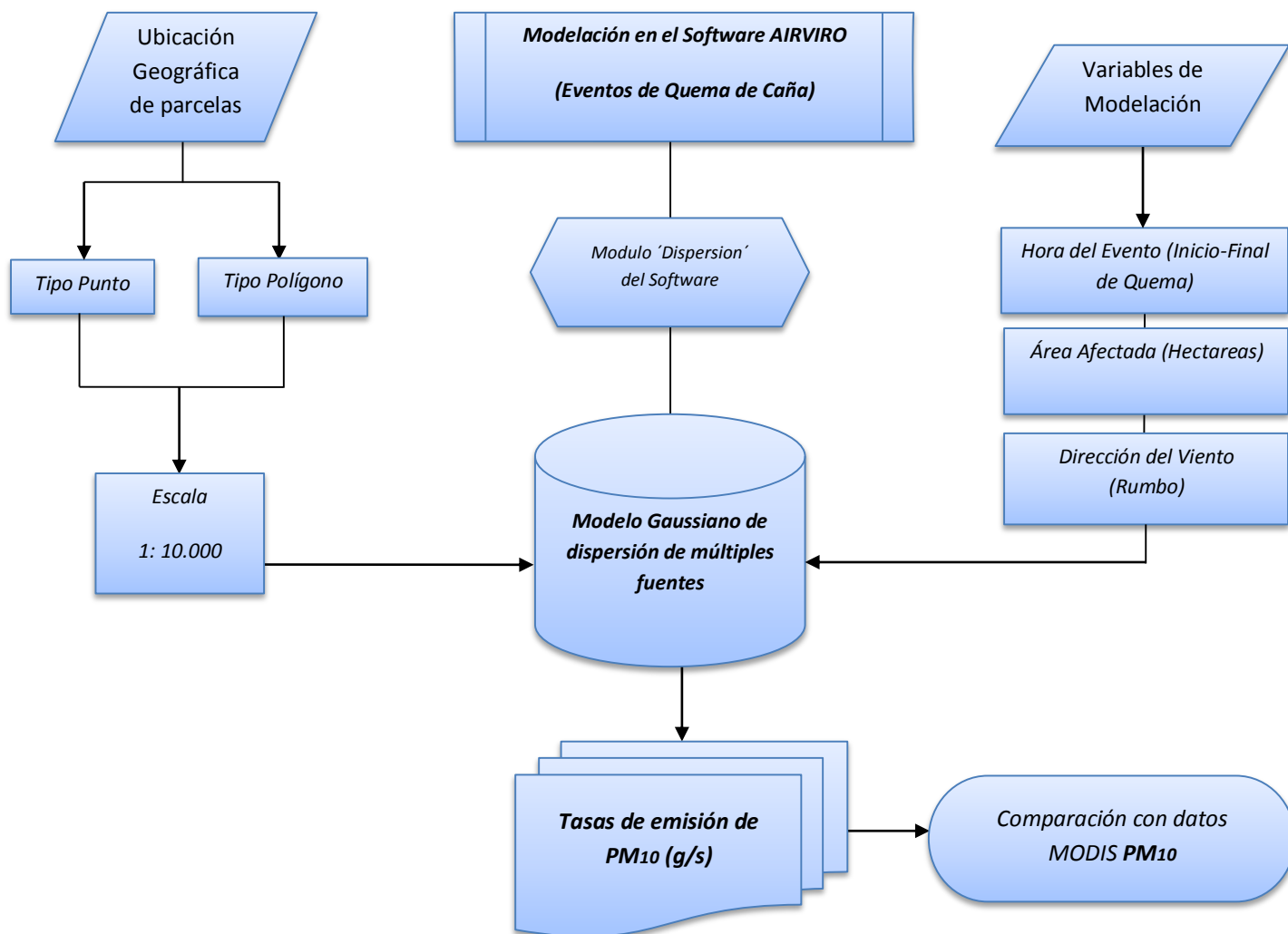
Un correcto análisis de los datos arrojados por el Software, solo sería posible si las horas de las quemas correspondían a las horas exactas de la captura de las imágenes satelitales



MODIS utilizadas para el proyecto, por esa razón se realizó una clasificación para los casos que cumplieran esta condición, dejando como resultado 12 simulaciones para el año 2011.

Al igual que en las secciones anteriores la Figura 18 muestra un esquema metodológico del proceso realizado con la plataforma Airviro y su comparación con los datos generados con las imágenes MODIS.

**Figura 19.** Esquema Metodológico del proceso Airviro



**Tabla 7.** Información de quema de caña para el 2011

<b>INFORMACIÓN DE QUEMA DE CAÑA PARA EL 2011</b>					
<b>No.</b>	<b>Nombre Ingenio</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre Municipio</b>	<b>Nombre Corregimiento</b>	<b>Nombre Hacienda</b>
1	Mayagüez	2011/01/11	Candelaria	La Regina	Rio Fraile - Diego Domínguez Mejía
2	Pichichi	2011/01/27	Ginebra	ND	LA CABAÑA
3	Pichichi	2011/02/28	El Cerrito	ND	EL ARBOLITO
4	Manuelita	2011/02/20	Palmira	La Acequia	GUAGUYA
5	Carmelita	2011/03/11	Yotoco	Rayito - La Negra	SAN MARTIN
6	Manuelita	2011/03/15	Guacarí	La Floresta	SIBERIA
7	Providencia	2011/04/01	El Cerrito	San Antonio	SAN MIGUEL CARVAJAL
8	Mayagüez	2011/04/14	Palmira	Tienda Nueva	El Guácimo
9	Mayagüez	2011/04/21	Candelaria	El Cabuyal	Coloradas
10	Mayagüez	2011/04/26	Pradera	Bolo Hartonal	El Tambo
11	San Carlos	2011/05/23	Tuluá	Nariño	MALLORCA ZULUAGA
12	Manuelita	2011/05/30	Candelaria	El Cabuyal	PALMERA GUZM

**Fuente:** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC

**Tabla 8.** Información de condiciones para quema de caña para el 2011

<b>INFORMACIÓN DE QUEMA DE CAÑA PARA EL 2011</b>								
<b>No.</b>	<b>Área Total Km²</b>	<b>Área Cosechada</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Hora Inicio</b>	<b>Dir. Viento Inicial</b>	<b>Dir. Viento Final</b>	<b>Mes</b>	<b>Año</b>
1	40,24	5,00	16:05	15:35	N	NE	1	2011
2	6,80	3,34	16:10	15:50	NW	NW	1	2011
3	43,55	4,53	16:20	16:00	NW	NW	2	2011
5	1,20	1,20	15:23	15:01	W	W	2	2011
6	12,74	5,49	15:45	15:13	NW	WSW	3	2011
7	16,53	5,00	15:40	15:15	W	WNW	3	2011
8	26,90	5,00	16:16	15:57	E	NE	4	2011
9	14,75	4,57	16:15	15:25	WSW	NE	4	2011
10	9,45	2,43	15:40	15:20	W	W	4	2011
11	11,19	5,19	16:20	15:45	NE	NNW	4	2011
12	8,41	3,92	15:49	15:25	NE	E	5	2011
13	17,04	6,00	15:45	15:17	S	SE	5	2011

**Fuente:** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC

## 7. RESULTADOS

### 7.1. ÁNGULOS DE DISPERSIÓN DE LA LUZ Y LA FUNCIÓN FASE DE DISPERSIÓN

Para evaluar PM<sub>10</sub> es necesario entender la dependencia con las geometrías de iluminación solar y de observación del satélite, pues a partir de estas se obtienen variables importantes como función fase de dispersión y albedo de dispersión simple. La Tabla 9 muestra el resumen de los resultados obtenidos de estas variables para cada uno de los días de muestra del año 2011 y la Tabla 10 para los valores del año 2012. Es importante mencionar que estas variables son representadas por valores constantes que indican las condiciones del aire y de la posición del sensor en el momento de la captura, las cuales se obtienen con modelos matemáticos que involucran la longitud de onda correspondiente a cada banda pero que son independientes del procesamiento de las imágenes, tal como se explicó en el proceso metodológico.

**Tabla 9.** Resultados preliminares para valores de AOT del año 2011

<i>Resultados Preliminares para el año 2012</i>						
<i>Día Juliano</i>	<i>Hora de Captura (h)</i>	<i>Ángulo del Sensor</i>	<i>Función Fase</i>	<i>Albedo de dispersión simple</i>		
				$\lambda 1$	$\lambda 3$	$\lambda 4$
2	16,17	-0,0491691	0,8967820	0,9977622	0,9992117	0,9987187
6	15,75	-0,0491691	1,2043558	0,9986316	0,9995182	0,9992168
11	16,08	-0,0491691	0,6906085	1,0447534	1,0152985	1,0251193
15	15,67	-0,0491691	0,6985384	0,9839815	0,9943062	0,9907736
22	15,75	-0,0491691	0,6920709	0,8992109	0,9620684	0,9397463
27	16,08	-0,0491691	0,7240342	0,9937652	0,9977979	0,9964239
51	15,25	-0,0491691	0,7029466	1,0068328	1,0023929	1,0038972
56	15,58	-0,0491691	0,6909130	1,0929912	1,0308507	1,0511581
59	16,08	-0,0491691	0,7320061	0,9945064	0,9980607	0,9968501
63	15,67	-0,0491691	0,7594814	0,9959017	0,9985546	0,9976515
70	15,75	-0,0491691	1,0609508	0,9983676	0,9994252	0,9990656
74	15,33	-0,0491691	1,3379166	0,9987957	0,9995760	0,9993107
86	15,75	-0,0491691	0,6914925	1,0159187	1,0055423	1,0090444
91	16,08	-0,0491691	0,7312967	1,0041696	1,0014627	1,0023809
104	15,58	-0,0491691	1,3103772	0,9987655	0,9995654	0,9992935
111	15,67	-0,0491691	0,7118321	1,0054923	1,0019251	1,0031344
116	16,00	-0,0491691	1,1962721	1,0013243	1,0004654	1,0007571
120	16,75	-0,0491691	0,9042383	0,9978048	0,9992267	0,9987431
122	15,33	-0,0491691	0,6905439	1,0313164	1,0107966	1,0176771
130	16,17	-0,0491691	0,8975366	0,9977666	0,9992133	0,9987212
140	15,17	-0,0491691	0,6920465	1,0140672	1,0049035	1,0079987
143	15,83	-0,0491691	0,9208765	0,9978920	0,9992575	0,9987931
150	15,75	-0,0491691	1,0396391	0,9983148	0,9994066	0,9990353

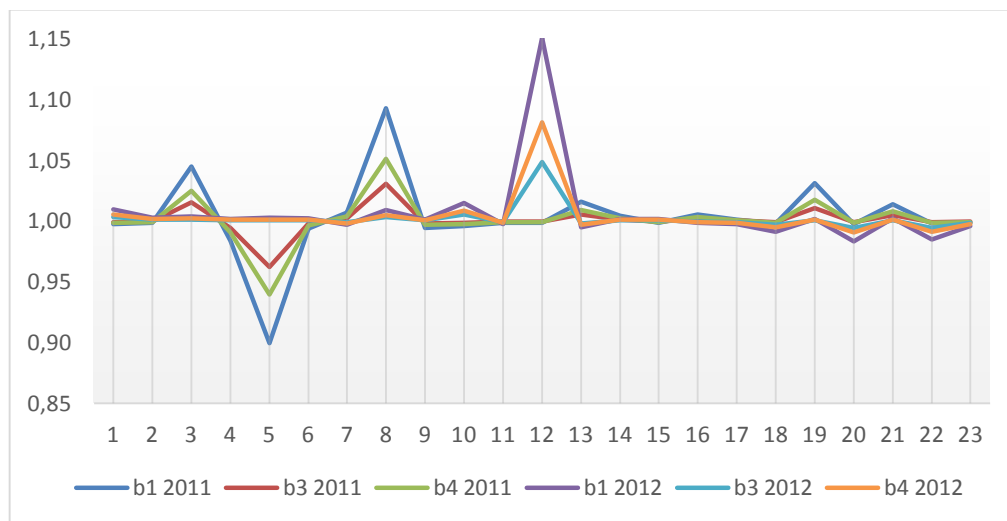
**Tabla 10.** Resultados preliminares para valores de AOT del año 2012.

<i>Resultados Preliminares para el año 2012</i>						
<i>Día Juliano</i>	<i>Hora de Captura (h)</i>	<i>Ángulo del Sensor</i>	<i>Función Fase</i>	<i>Albedo de dispersión simple</i>		
				$\lambda 1$	$\lambda 3$	$\lambda 4$
1	14,92	-0,0491691	0,6952177	1,0098230	1,0034335	1,0055956
7	16,00	-0,0491691	0,7988675	1,0026987	1,0009476	1,0015420
9	15,75	-0,0491691	0,7392448	1,0038579	1,0013537	1,0022032
16	15,83	-0,0491691	0,9281851	1,0018804	1,0006606	1,0010748
25	15,75	-0,0491691	0,8147703	1,0025354	1,0008904	1,0014487
27	15,58	-0,0491691	0,8320146	1,0023889	1,0008390	1,0013652
32	15,83	-0,0491691	0,7957552	0,9967659	0,9988600	0,9981474
33	14,92	-0,0491691	0,6967554	1,0088783	1,0031052	1,0050595
45	15,33	-0,0491691	1,3223297	1,0011977	1,0004210	1,0006848
46	16,08	-0,0491691	0,6916963	1,0151315	1,0052709	1,0086000
48	15,83	-0,0491691	0,8943197	0,9977476	0,9992065	0,9987103
64	15,83	-0,0491691	0,6910816	1,1510609	1,0483976	1,0811646
68	15,50	-0,0491691	0,7344288	0,9946862	0,9981244	0,9969534
71	16,00	-0,0491691	0,9199408	1,0019114	1,0006715	1,0010925
73	15,75	-0,0491691	0,9971631	1,0016704	1,0005869	1,0009548
75	15,58	-0,0491691	1,3194422	0,9987756	0,9995690	0,9992992
93	15,33	-0,0491691	0,8378999	0,9973132	0,9990532	0,9984613
114	15,67	-0,0491691	0,7097236	0,9912084	0,9968897	0,9949519
116	15,50	-0,0491691	0,9430835	1,0018280	1,0006423	1,0010449
121	15,75	-0,0491691	0,6981942	0,9834425	0,9941126	0,9904610
123	15,58	-0,0491691	0,8891511	1,0020433	1,0007178	1,0011678
139	15,58	-0,0491691	0,6990412	0,9846906	0,9945608	0,9911848
150	15,25	-0,0491691	0,7601398	0,9959237	0,9985623	0,9976642

En las Tablas 9 y 10, los ángulos de iluminación y observación son variables que se expresan en unidades de radianes, mientras que la función fase de dispersión y el albedo de dispersión simple son variables adimensionales que expresan condiciones dependiendo de sus valores, por ejemplo, la función fase está expresando el patrón de direccionamiento de los haces de luz que son dispersados o retrodispersados por los aerosoles presentes en la zona de estudio dadas unas condiciones horarias; por otra parte, el albedo de dispersión simple expresa el nivel de absorción y dispersión que tienen las partículas presentes en la zona, sus valores oscilan entre 0 – 1, donde valores próximos a 0 indican partículas que absorben mucha energía, mientras que valores cercanos a 1 se relacionan con partículas poco absorbentes (García, 2010; Esteve, 2010; Kaufman & Tanré, 1998), entonces según los valores presentes en las tablas es posible notar que los aerosoles presentes en la zona de estudio presentan una tendencia a ser poco absorbentes, puesto que todos se

encuentran próximos a 1, sin embargo, es posible apreciar que algunos valores muestran un sobrepaso de 1, esto se debe a la acumulación de valores residuales, los que por practicidad no son tomados en cuenta. Para expresar de forma más explícita los resultados del albedo de dispersión simple, la Figura 19 muestra la tendencia que se presenta para cada uno de los 23 escenarios de los años 2011 y 2012, donde el eje Horizontal indica los días de estudio evaluados y el eje vertical indica los valores de albedo de dispersión simple. Con los datos obtenidos es posible notar que el aire presenta un patrón constante de poca absorción por lo que se puede afirmar que según las condiciones del aire es el patrón de comportamiento predominante en la zona de estudio.

**Figura 19.** Tendencias de absorción y dispersión para la zona de estudio en años 2011 y 2012



Ahora bien, de las Tablas 9 y 10 también es posible notar que todos los ángulos de observación del sensor para las fechas estudiadas son iguales, esto se debe a que se aplica la Ecuación (4) en la que, las variables presentan valores constantes como se indican en la Tabla 11.

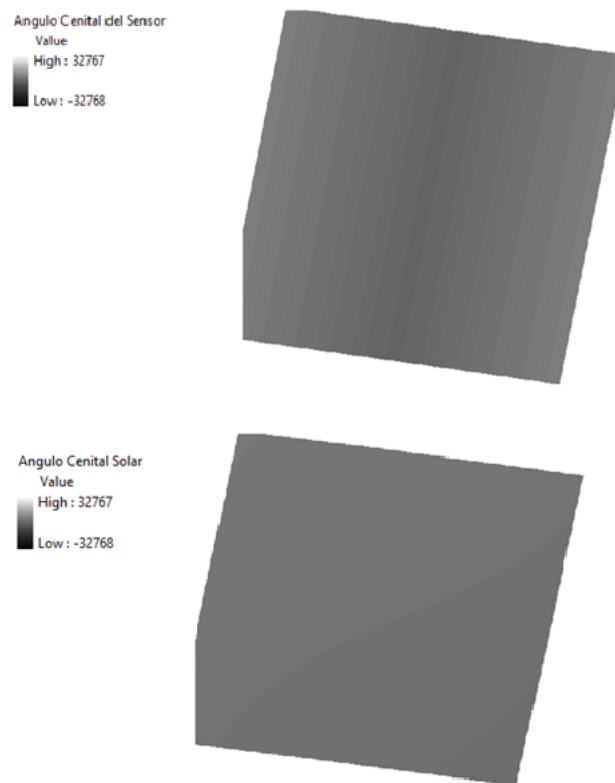
**Tabla 11.** Parámetros del sensor para el cálculo del ángulo de observación

<b>Condiciones del sensor</b>		
<b>Altura del Sensor</b>	<b><math>h=</math></b>	705 m
<b>Radio terrestre</b>	<b><math>R_t=</math></b>	6.357 m
<b>Ángulo de barrido del Sensor</b>	<b><math>\eta=</math></b>	110°

Estas condiciones indican que el sensor se mantiene en una posición constante con respecto al eje de su órbita (García-Mora et al, 2011), es decir, una órbita circular, por lo que los valores residuales de la ecuación se mantienen siempre constantes. Ahora bien, el

producto MOD02 dentro de su paquete de bandas ofrece dos elementos referentes a los ángulos de observación e iluminación para cada pixel del escenario que se descargue. La Figura 20 muestra un ejemplo de este producto para el 02 de enero del 2011, donde la toma fue realizada a las 4:00 Pm.

**Figura 20.** Bandas 11 y 14 del producto MOD02



Sin embargo, estos productos se ofrecen pre-procesados y esto genera una alteración de los resultados esperados, dado que se les aplica correcciones atmosféricas y geométricas alterando la información generada y la posición de la misma (Nishihama, 1997).

## 7.2. REFLECTANCIA SUPERFICIAL

Posteriormente, tras obtener los resultados de las variables anteriores, se aplicó la Ecuación (10) para obtener la reflectancia superficial, esta operación se realiza mediante dos etapas. La etapa inicial consta de obtener una cifra constante que se opera en la segunda etapa con la radiancia que captura el sensor MODIS; en este caso, corresponde a las radiancias representadas por las bandas 1, 3 y 4 que se explicaron en capítulos anteriores. Luego de completar el procedimiento se obtiene la reflectancia superficial en

formato raster de los que se presenta los promedios globales, por practicidad, de cada banda con su respectivo día juliano en la Tabla 12 para los años 2011 y 2012.

**Tabla 12.** Resultados preliminares para la reflectancia superficial

<i>Resultados Preliminares de Reflectancia Superficial</i>							
<i>Reflectancia superficial (%) 2011</i>				<i>Reflectancia superficial (%) 2012</i>			
<i>Día Juliano</i>	$\lambda 1$	$\lambda 3$	$\lambda 4$	<i>Día Juliano</i>	$\lambda 1$	$\lambda 3$	$\lambda 4$
2	23,00	43,14	44,74	1	15,95	26,59	27,60
6	13,93	27,90	29,76	7	26,65	39,83	40,81
11	28,96	27,90	46,34	9	16,10	30,36	31,55
15	13,86	23,83	25,36	16	18,44	30,44	31,50
22	13,08	26,24	28,03	25	12,30	25,63	26,99
27	20,66	37,36	39,05	27	20,38	30,07	31,16
51	18,09	28,28	29,96	32	19,10	32,63	33,69
56	18,22	30,25	31,33	33	14,87	27,62	28,83
59	26,72	38,93	40,05	45	15,89	23,80	25,03
63	11,72	22,22	23,92	46	15,12	34,30	35,75
70	11,77	22,54	23,96	48	17,37	29,96	31,05
74	11,69	20,81	22,69	64	20,99	28,75	29,57
86	11,75	24,07	25,70	68	15,48	24,88	26,26
91	15,31	28,40	29,64	71	21,91	35,46	36,27
104	16,44	26,83	28,36	73	21,56	31,85	32,73
111	22,68	32,74	33,59	75	20,69	29,33	30,25
116	16,20	29,36	30,67	93	16,75	25,38	26,80
120	28,06	46,95	49,99	114	12,52	21,84	23,08
122	19,55	26,80	27,74	116	11,94	21,20	22,61
130	27,59	45,01	45,77	121	21,40	33,21	34,00
140	12,87	23,29	24,98	123	14,85	23,67	24,86
143	20,65	31,75	33,03	139	16,07	26,72	27,95
150	20,59	33,54	34,79	150	21,48	29,23	30,23

De los resultados anteriores se puede entender que debido a que la zona de estudio es la misma para todas las capturas utilizadas, las características morfológicas de los suelos y la vegetación es aparentemente continua, sin embargo, la dinámica de la atmósfera varía según las temporadas en la que se realiza la captura, es posible plantear esta hipótesis basándose en las afirmaciones de Kaufman & Tanré, 1998; Chávez, 1996 y Remer et al, 2005; quienes expresan que la variabilidad en la reflectancia superficial radica en el tipo de cobertura de la zona de estudio, entonces como este no es el caso y sí lo es la dinámica

atmosférica se puede relacionar la variabilidad de la reflectancia a este fenómeno. Un factor adicional que permite realizar esta hipótesis es la gran variabilidad de brillos y opacidad que produce la nubosidad de la zona de estudio, pues como se presentó anteriormente la zona seleccionada a pesar de tener una constante en los vientos es una zona con una gran humedad e intersección de vientos debido a las cordilleras y a su proximidad con la costa pacífica (Fernández & Ruiz, 1998)

Por otra parte, es posible ratificar las conclusiones de Kaufman & Tanré, 1998; cuando afirman que para la reflectancia superficial existe una relación inversamente proporcional con la longitud de onda, de la Tabla 12 se destaca el incremento de los valores de reflectancia a medida que disminuye la longitud de onda. De esta forma es posible sesgar los resultados del proyecto a los criterios teóricos aplicados.

### 7.3. ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL (AOT)

Para dar continuidad a la presentación de los resultados obtenidos, ahora se centrará la atención en una de las variables más importantes de este estudio, el AOT. El espesor óptico de aerosoles (AOT) para este caso de estudio se obtuvo para cada una de las bandas del sensor MODIS que fueron utilizados. La Tabla 13 muestra un promedio global de cada imagen obtenida, por practicidad, por día de estudio con su respectiva hora de captura para el año 2011, este promedio fue obtenido utilizando aquellos pixeles que representan nubosidad en la imagen dado que el vapor de agua es también un aerosol de origen natural. Como se mencionó en capítulos anteriores los aerosoles pueden ser partículas sólidas y líquidas, y bien las nubes comparten ambas propiedades y de ahí la razón para incluirlas dentro del análisis.

**Tabla 13.** Resultados de AOT incluyendo pixeles con nubosidad para el año 2011

<b>Resultados para el año 2011</b>				
<b>Día Juliano</b>	<b>Hora de Captura</b>	<b>AOT</b>		
		<b><math>\lambda 1</math></b>	<b><math>\lambda 3</math></b>	<b><math>\lambda 4</math></b>
<b>2</b>	16,17	0,046215583	0,08205012	0,0874877
<b>6</b>	15,75	0,025536189	0,04954781	0,05369477
<b>11</b>	16,08	0,270478046	0,55928267	0,50142399
<b>15</b>	15,67	0,009017988	0,01461767	0,00055779
<b>22</b>	15,75	0,255684981	0,71542342	0,65187446
<b>27</b>	16,08	0,042247595	0,06166063	0,07216053
<b>51</b>	15,25	0,103949579	0,18016804	0,18153777
<b>56</b>	15,58	0,357929273	0,83630871	0,7437986
<b>59</b>	16,08	0,060567612	0,07404223	0,08350789
<b>63</b>	15,67	0,032874683	0,05551167	0,06344859
<b>70</b>	15,75	0,026448972	0,0487482	0,05284241



<b>74</b>	15,33	0,026220112	0,04538732	0,05019459
<b>86</b>	15,75	0,083816876	0,20454251	0,20096525
<b>91</b>	16,08	0,05939926	0,11827768	0,11922804
<b>104</b>	15,58	0,033981362	0,05391104	0,05779264
<b>111</b>	15,67	0,114276781	0,18006828	0,1769753
<b>116</b>	16,00	0,034092025	0,06341709	0,06539815
<b>120</b>	16,75	0,042072781	0,0667242	0,07299208
<b>122</b>	15,33	0,206675879	0,35992296	0,33326481
<b>130</b>	16,17	0,060836427	0,0939531	0,09822231
<b>140</b>	15,17	0,093470777	0,19916006	0,19760208
<b>143</b>	15,83	0,051030777	0,07452813	0,07958444
<b>150</b>	15,75	0,047285245	0,07402739	0,07834552

Según la definición teórica del AOT los valores próximos a “0” indican una presencia de partículas finas en la zona de estudio y por otra parte los valores próximos a “1” indican presencia de partículas gruesas como suelen denominarse, en este orden de ideas, los resultados presentados en la Tabla 13 indican que hay una distribución de partículas gruesas pues su resultados se aproximan a “0”, esto puede explicarse por la presencia de nubes ya que estas contienen partículas de agua, partículas salinas provenientes de los vientos marítimos dada la proximidad con la costa pacífica entre otras partículas presentes en las nubes

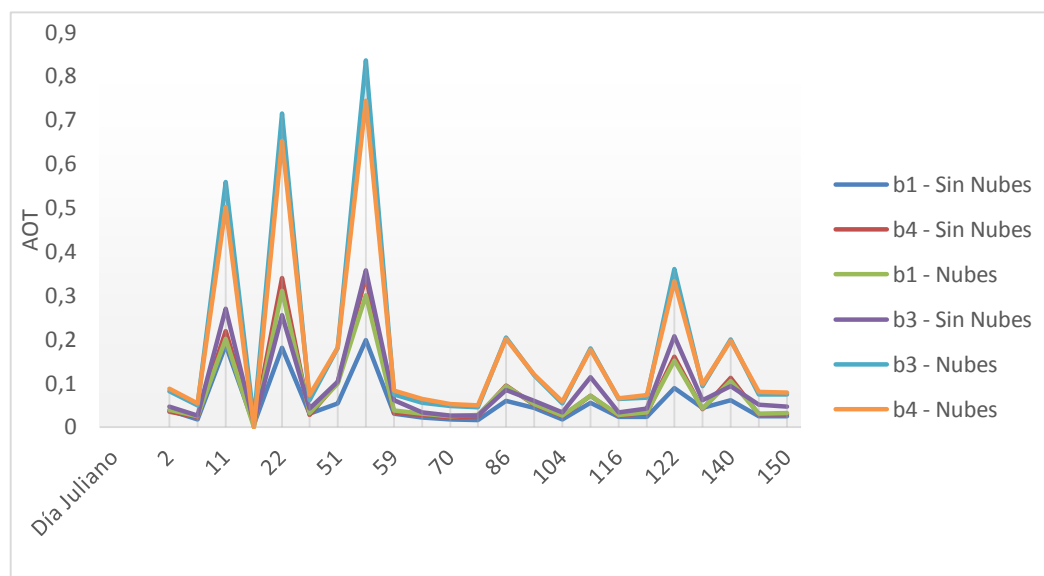
Por otra parte, en la Tabla 14, se presentan los promedios obtenidos para el mismo año, sin incluir los píxeles que representan nubosidad, esto con el fin de aplicar una selección de la información útil para obtener la concentración de PM<sub>10</sub>. Si bien la nubosidad es un tipo de aerosol atmosférico los resultados que se obtienen para estos píxeles son valores atípicos que afectan los resultados obtenidos. Adicionalmente, toda el área cubierta por nubosidad posee un único valor para cada uno de estos píxeles; una explicación para esto puede ser la metodología empleada, específicamente la regresión lineal aplicada en el último paso metodológico puesto que es un procedimiento para hallar explícitamente PM<sub>10</sub> y no otros componentes en particular y por esta razón se asocian los resultados obtenidos con las características de este tipo de material particulado. Los píxeles que representan nubosidad no son tenidos en cuenta para la obtención de PM<sub>10</sub> debido a la inutilidad de sus valores para el estudio realizado.

**Tabla 14.** Resultados de AOT excluyendo pixeles con nubosidad para el año 2011

<b>Resultados para el año 2011</b>				
<b>Día Juliano</b>	<b>Hora de Captura</b>	<b>AOT</b>		
		<b>b1</b>	<b>b3</b>	<b>b4</b>
2	16,17	0,037382173	0,03563366	0,03877392
6	15,75	0,017940804	0,02268216	0,02443066
11	16,08	0,18703766	0,21936686	0,20099288
15	15,67	0,005039534	0,00660743	0,00025617
22	15,75	0,180678788	0,33964588	0,3108944
27	16,08	0,031226467	0,02739558	0,03252236
51	15,25	0,053605512	0,10178846	0,09983778
56	15,58	0,198175777	0,34334992	0,30024195
59	16,08	0,030680145	0,03195104	0,03748678
63	15,67	0,02129092	0,02710932	0,0310274
70	15,75	0,017646459	0,02229556	0,02463319
74	15,33	0,015839721	0,02520279	0,02806596
86	15,75	0,059970827	0,0946725	0,09336881
91	16,08	0,043566319	0,05048188	0,05240389
104	15,58	0,018094653	0,02454525	0,02654858
111	15,67	0,054798007	0,07170541	0,07163942
116	16,00	0,02344384	0,02624705	0,02779587
120	16,75	0,022990367	0,03144205	0,03386805
122	15,33	0,089058073	0,16006674	0,15225183
130	16,17	0,043389225	0,0412126	0,04272195
140	15,17	0,060635282	0,11292922	0,10552973
143	15,83	0,0248637	0,02862477	0,03097363
150	15,75	0,025376632	0,02978516	0,03200124

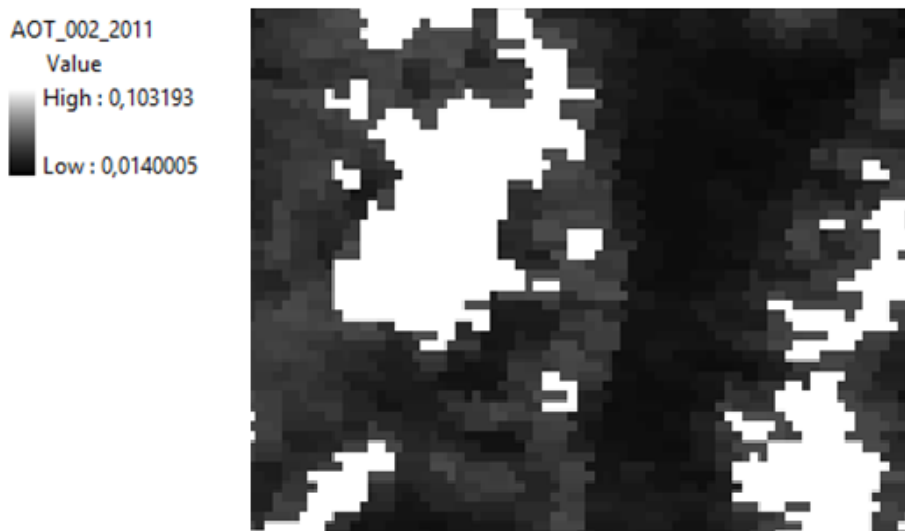
Ahora bien, para explicar la tendencia del AOT con y sin nubes para el año 2011 la Figura 21 muestra una serie de tiempo en la que se aprecia además del comportamiento temporal, la disparidad en los valores que incluyen la nubosidad, donde el eje vertical representa los valores del AOT con respecto al eje horizontal que representa los días de estudio utilizados. Con la ayuda de esta figura, se puede entender que la inclusión de las áreas con nubosidad puede significar alteraciones en el propósito de determinar PM<sub>10</sub>, puesto que a pesar de mantener un comportamiento similar los valores que se obtienen se elevan casi al doble de los datos sin nubosidad

**Figura 21.** Promedio de AOT con y sin presencia de nubosidad para el año 2011.



Teniendo en cuenta la influencia de la nubosidad en los promedios globales de AOT, la Figura 22 presenta como en las zonas cubiertas de nubosidad ocurre una homogenización de único valor para este grupo de píxeles, según la leyenda del ejemplo representado por esta figura, entonces, además de interferir en los valores globales de AOT, la nubosidad representa una aparente pérdida de información para el propósito de obtener PM<sub>10</sub>.

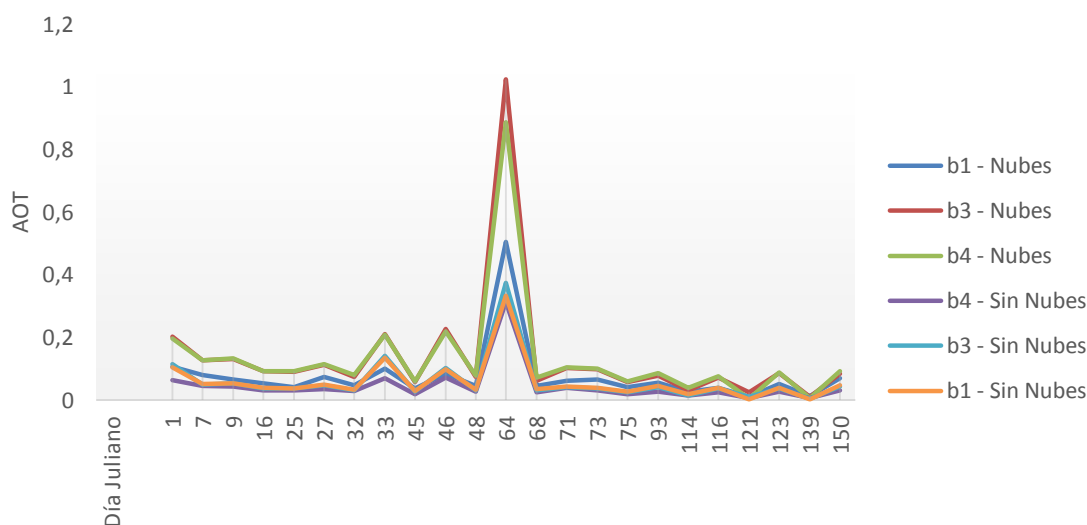
**Figura 22.** Homogeneidad de valores en píxeles con nubosidad



Por otra parte los resultados presentados en la Tabla 14 indican que hay una mayor distribución de partículas finas, pues según la teoría planteada (Kaufman et al., 1997; Kaufman & Tanré, 1998; Kaufman Y., 1989) los valores de AOT próximos a “0” representan una presencia de partículas finas. Para efectos de este caso de estudio, se da preferencia a la idea que sugiere la Tabla 14 pues el propósito es determinar concentración de partículas finas como lo son las partículas de diámetro  $\leq 10 \mu\text{g}$ . Entonces, puede afirmarse que en los periodos de estudio utilizados, la zona geográfica plana del río cauca es una zona en la que se encuentra una distribución uniforme de partículas finas, en la que además de PM<sub>10</sub> es posible hallar PM<sub>2.5</sub> y demás tipos de partículas finas.

De la misma forma que con los periodos del 2011, mediante el uso de los promedios globales de las imágenes obtenidas del procesamiento, la Figura 23 presenta la tendencia del AOT en el tiempo para los periodos utilizados en el año 2012.

**Figura 23.** Promedio de AOT con y sin presencia de nubosidad para el año 2012



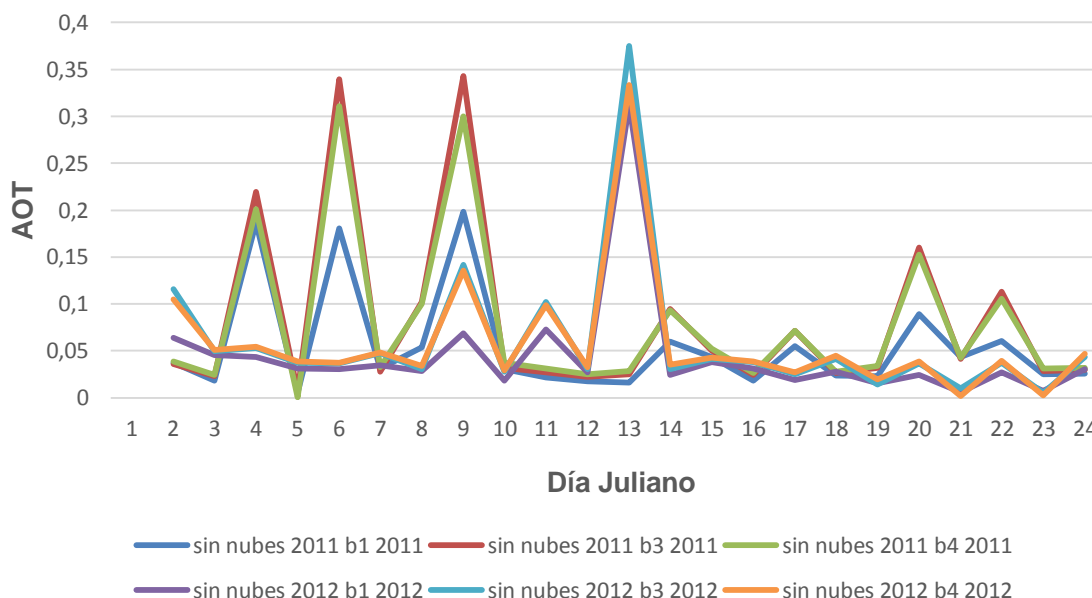
A diferencia del año 2011, se puede observar en la Figura 23 que para el año 2012 la nubosidad no representó alteraciones demasiado significativas en los promedios obtenidos de AOT, además, según los promedios obtenidos es posible afirmar que para este periodo de tiempo no se detectó un gran contenido de partículas gruesas, por la proximidad de los valores a “0”, ni siquiera en los promedios que incluyen las áreas de nubosidad, a excepción del día 64 donde se presenta una alta significativa en los valores; a partir de estas situaciones es posible contemplar la idea de una mayor distribución de partículas finas en la zona de estudio pues también se tiene un comportamiento de AOT relativamente constante en el tiempo con relación a este tipo de partículas pues los resultados se aproximan a 0, entonces basándose en las situaciones que indican las figuras 22 y 23 es posible notar que el comportamiento de los aerosoles con y sin presencia de nubosidad es variable en una escala temporal y por ende se descarta la posibilidad de definir un

comportamiento normal de este fenómeno en la zona de estudio, esto sólo para los periodos de tiempo evaluados.

Para definir un punto de partida que indique una diferencia entre la actitud de los aerosoles para los años 2011 y 2012, a través de la Figura 24 se realizó una confrontación entre los promedios obtenidos excluyendo las áreas cubiertas por nubosidad para cada banda utilizada. De esta comparación se tiene que de los 23 días de estudio para cada año, el 2011 presentó mayor variabilidad en el tipo de partícula detectada, es decir, se tienen intervalos de tiempo en el que hay mayor presencia de partículas gruesas e intervalos de tiempo en el que hay mayor presencia de partículas finas, esto es posible deducirlo observando los picos de la línea de tendencia para esa época, mientras que para el año 2012, como se mencionó antes hay mayor presencia de partículas finas debido a la constancia de posición de las líneas de tendencia.

A partir de estas deducciones es posible plantear que en el periodo del 2012 hay posibilidades de detectar mayores cantidades de PM<sub>10</sub> pues es el tipo de partícula predominante en estos escenarios.

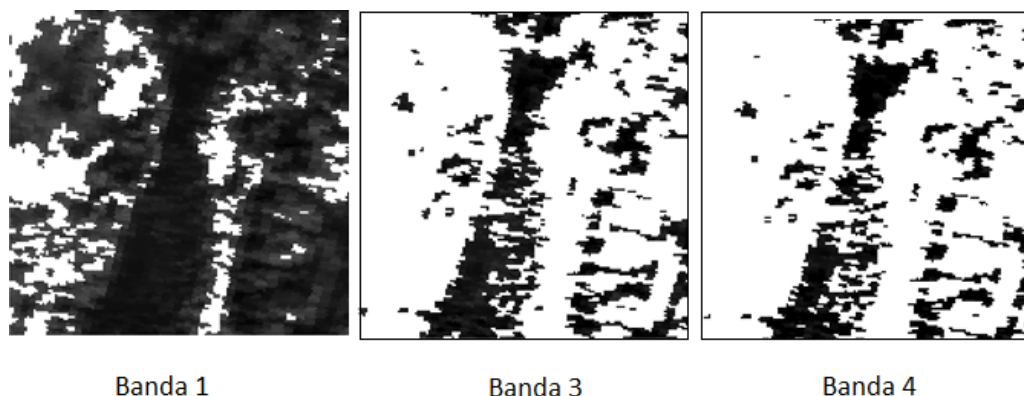
**Figura 24.** Promedios de AOT para periodos de 2011 y 2012



A partir de la Figura 24 también se puede observar como las bandas 3 y 4 presentan una mayor tasa de absorción de energía para el AOT, por esto, la Figura 25 presenta un ejemplo de la cobertura de nubes para cada una de las bandas y se puede apreciar como esta cobertura incrementa de forma proporcional al tamaño de la longitud de onda, esto debido

a que las longitudes de onda que representan las imágenes son de mayor tamaño y por ende son susceptibles a partículas de un tamaño proporcional (NASA<sup>4</sup>).

**Figura 25.** Coberturas de nubosidad por banda (Canal) utilizada



#### 7.4. CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>)

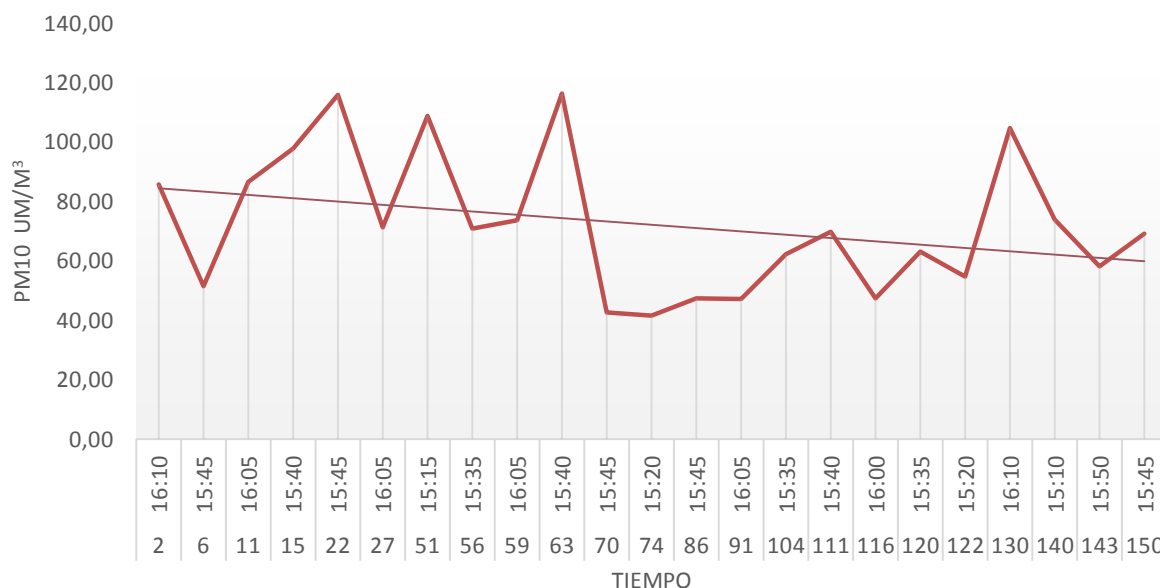
Con el promedio global de AOT para cada uno de los días utilizados para el estudio, se aplicó una regresión lineal expresada por la ecuación (19) con respecto a la normatividad de calidad de aire (EPA (NAAQS), 1990), con esto, fue posible calcular la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> para la zona de estudio a través de los coeficientes empíricos generados por dicha regresión, los cuales se pueden observar en el anexo B, donde el coeficiente elegido para cada banda es la pendiente de las ecuaciones lineales obtenidas tras la regresión aplicada. Luego de explicar las alteraciones resultantes tras el uso de los píxeles que representan nubosidad, cabe mencionar que para el cálculo de PM<sub>10</sub>, se han omitido aquellos píxeles.

Mediante la Figura 26 se presenta el promedio diario obtenido para cada uno de los días de estudio del año 2011, esto con el fin de llevar a cabo el análisis temporal de la información, en la que es posible observar una gran variabilidad en los valores resultantes, los cuales oscilan entre 40µg/m<sup>3</sup> y 120µg/m<sup>3</sup>, situación que será discutida más adelante con respecto a la normativa de calidad de aire.

---

<sup>4</sup> <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

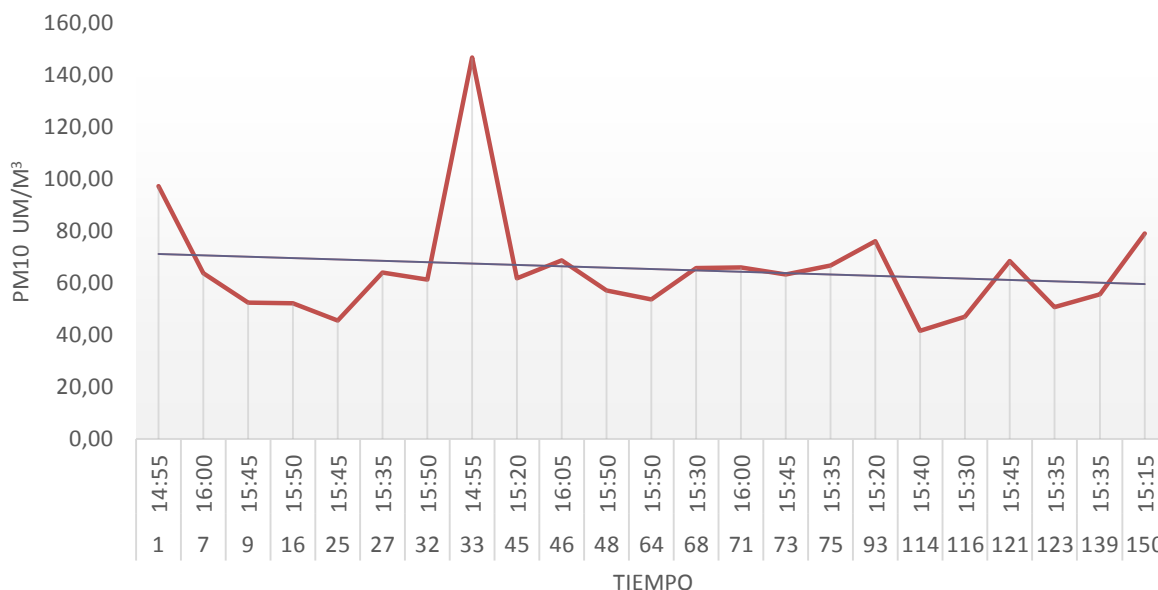
**Figura 26.** Promedios diarios de PM10 para el año 2011 obtenidos con imágenes MODIS



la Figura 26 muestra una relación de concentración y tiempo, que según la línea de tendencia, los resultados para todo el periodo 2011 son decrecientes, sin embargo, se puede observar que hasta el día 70 hay una aparente constancia en el valor de los resultados en el que se tienen niveles altos, y después del mismo día 70 los valores disminuyen conservando un comportamiento constante (Can et al., 2011; Emili et al., 2010; Wang et al., 2010).; una explicación para este comportamiento puede estar asociado con la variabilidad climática de la zona para el periodo evaluado (OSSO, 2012).

Por otra parte, la Figura 27 presenta los resultados obtenidos para los días de estudio del año 2012, en este caso, a diferencia del 2011, se presentó una tendencia de mayor constancia en la que los valores oscilan entre  $41\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $146\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; excepto por el día 33 es posible observar en esta figura que los resultados obtenidos se mantienen por debajo de la norma anual según la EPA (1990), en la que se encuentran los límites permisibles para concentración de PM10.

**Figura 27.** Promedios diarios de PM10 para el año 2012 obtenidos con imágenes MODIS



Los resultados de PM10, confirman entonces las hipótesis planteadas con los resultados obtenidos de AOT (Othman et al., 2010; Can, N, & Si-Chee, 2011; Donkelaar, 2011; Emili et al., 2011), donde se afirmó que existía una relación entre ambas variables, dado que los promedios cercanos a “0” del AOT representan una mayor existencia de partículas de tipo fino como lo es el PM10.

## 7.5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con el cálculo de PM10 realizado, es necesario comprobar si estos resultados corresponden a la realidad, para ello, se llevó a cabo una validación de los datos empleando un grupo de 7 estaciones que miden calidad de aire, las cuales se encuentran distribuidas a los largo de la zona de estudio. De estas 7 estaciones 2 no fueron de utilidad puesto que no registraron funcionamiento continuo, la estación de ACOPI solo presentó datos para 2 días del año 2011, de los 46 días de estudio que abarcan los años 2011 y 2012, esto representa el 4,34% del periodo de tiempo efectivo; mientras que la estación urbana de candelaria no registró dato de utilidad para ninguno de los 46 días de estudio.



Referente a las 5 estaciones restantes se presentó una funcionalidad más continua pese a que no fue de la totalidad de los días, la Tabla 15 relaciona el porcentaje de funcionalidad para cada una de las estaciones.

**Tabla 15.** Condiciones de servicio de la red de calidad de aire.

<i>Estación</i>	<i>Tipo de estación</i>	<i>Días de utilidad - 2011</i>	<i>Días de utilidad - 2012</i>	<i>% de utilidad 2011</i>	<i>% de utilidad 2012</i>	<i>% de utilidad total</i>
<b>Tuluá</b>	Rural	21	20	91,30	86,96	89,13
<b>Candelaria</b>	Rural	23	20	100,00	86,96	93,48
<b>Cerrito</b>	Rural	19	22	82,61	95,65	89,13
<b>Palmira</b>	Rural	12	5	52,17	21,74	36,96
<b>Puerto Tejada</b>	Rural	11	4	47,83	17,39	32,61

Según la Tabla 15, los porcentajes de funcionalidad de las estaciones son poco alentadores, pues tan sólo 3 de las 7 estaciones superan el 50% de utilidad para los periodos de estudio definidos. De esta manera estos resultados concuerdan con estudios realizados anteriormente como el de Álvarez (2007), en el que se utilizó la estación de Palmira para llevar a cabo un análisis de la relación de PM<sub>10</sub> y enfermedades respiratorias, donde de 365 días de muestra tan sólo se encontró registro de 119 días por parte de la estación, lo que equivale a un 52,05% de la totalidad de la muestra, poco más de lo que se registra en la totalidad de los periodos para este caso en particular.

A pesar de que la anomalía de las estaciones puede repercutir de forma negativa sobre el estudio realizado, no se cuenta con otro método de medición por parte de las entidades gubernamentales del Departamento del Valle del Cauca, por lo que esta es la única fuente de información que puede ser utilizada para comprobar los niveles de PM<sub>10</sub> en la zona. Por consiguiente, se procedió a realizar regresiones lineales con cada una de las estaciones para cada uno de los días y de esta manera observar cómo se comportan los coeficientes de correlación en un intervalo de 0 a 1 donde 1 representa una validación o correlación del 100%.

Retomando de la descripción metodológica, los valores que serán comparados con los datos de las estaciones de calidad de aire se han obtenido mediante la extracción de la zona de influencia de cada estación, teniendo en cuenta que cada estación tiene un radio de acción con respecto a su ubicación los cuales han sido relacionados en la Tabla 5. Entonces, de cada imagen de PM<sub>10</sub> se extrajo dicho radio de acción por cada estación, resultando hasta 7 recortes por imagen.

De las regresiones lineales realizadas para el mes de enero del año 2011, resultaron las gráficas de tendencia agrupadas en la Figura 28, donde se tiene que para este mes, 5 de los 6 grupos de datos superó el umbral de  $R^2 = 0,5$  lo que representa un 50% de similitud

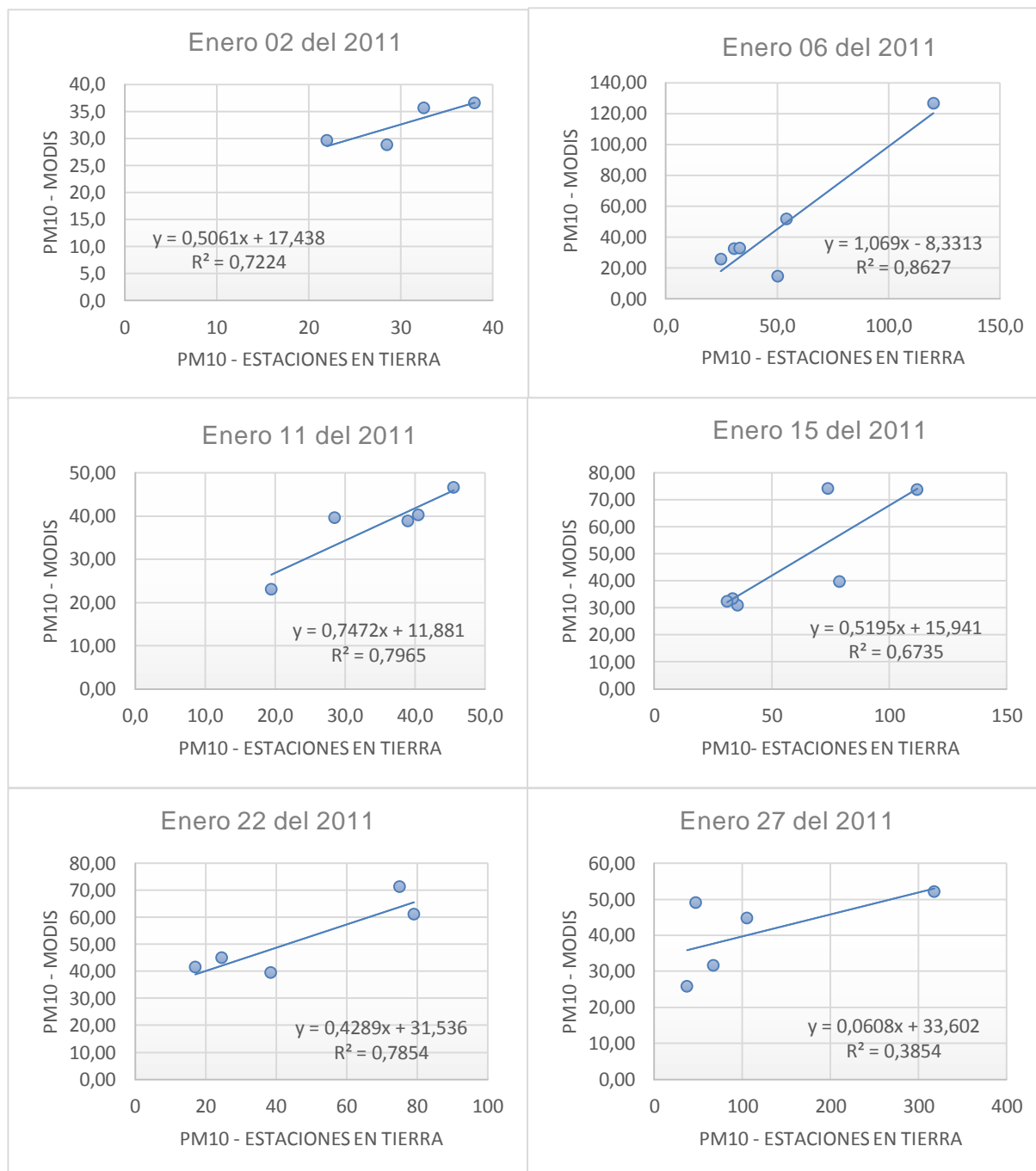
entre los datos; dicha similitud indica que los datos obtenidos aplicando la metodología propuesta son consecuentes con la realidad según los datos de las estaciones de calidad de aire, siendo el resultado más destacable el del día 6 de enero con un  $R^2 = 0,86$ ; lo que representa un 86% de equivalencia entre los datos calculados y los datos de referencia. El día 6 de enero presentó la mayor cantidad de registro de estaciones contando con datos de 6 de los 7 puntos monitoreados.

El procedimiento de realizar regresiones lineales para cada zona de influencia de las estaciones con respecto a las imágenes de PM<sub>10</sub> se llevó a cabo con cada uno de los días de estudio de los meses de Enero a Mayo del 2011 y del año 2012. Los resultados obtenidos de las regresiones aplicadas se presenta de manera resumida en la Tabla 16 para el año 2011 y en la Tabla 17 para el año 2012, las cuales contienen la Ecuación lineal y el  $R^2$  obtenidos para cada día de estudio.

**Tabla 16.** Productos obtenidos de regresiones lineales para el año 2011.

Día Juliano	Fecha	Ecuación Lineal	R2
51	feb-19	$Y = 0,82272x + 9,9934$	0,9537
56	feb-24	$Y = 0,4581x + 18,469$	0,7582
59	feb-27	$Y = -0,2256x + 47,545$	0,1361
63	mar-03	$Y = -0,0547x + 45,559$	1
70	mar-10	$Y = 0,1337x + 11,325$	0,7157
74	mar-14	$Y = 0,2097x + 4,8677$	0,4439
86	mar-26	$Y = 0,3738x + 9,9755$	0,7671
91	mar-31	$Y = 0,4513x - 7,898$	0,2504
104	abr-13	$Y = 0,9333x + 4,1333$	0,8379
111	abr-20	$Y = 0,2875x + 25,244$	1
116	abr-25	$Y = 2,0044x + 14,599$	1
120	abr-29	$Y = -7,5714x + 1356,14$	1
122	may-01	$Y = -0,0225x + 11,763$	0,9435
130	may-09	$Y = 0,2088x + 51,266$	0,8615
140	may-19	$Y = 0,3642x + 23,795$	0,7557
143	may-22	$Y = 0,2318x + 25,026$	0,626
150	may-29	$Y = 0,5542x + 18,191$	0,7196

**Figura 28.** Regresiones lineales de validación para el mes de enero del año 2011.



De la Tabla 16 es posible observar que para los días 3 de marzo, 20 de abril, 25 de abril y 29 de abril; se obtuvieron  $R^2 = 1$ , esto ocurre debido a que para estos días citados sólo se tuvieron datos de dos estaciones, por esta razón la regresión lineal sólo alcanza su interpolación en un punto de salida y un punto de llegada sin presentar dispersión por causa de otros datos, esto trae como consecuencia para el estudio que se genere incertidumbre acerca de la veracidad de la información obtenida, puesto que al faltar información para comparar se hace imposible determinar si los datos calculados para esos días corresponden a la realidad, en este sentido, el mes más afectado por este acontecimiento es el mes de abril, el cual cuenta con cuatro muestras de datos, de las cuales sólo se obtuvo información suficiente para el día 13 de abril que presentó un  $R^2 = 0,83$ ; esto en términos del fenómeno estudiado representa una veracidad del 83% con respecto a los datos de las estaciones de calidad de aire, lo que supone un resultado satisfactorio.

El día 31 de marzo arrojó un  $R^2 = 0,25$  lo que representa una equivalencia del 25% y el día 27 de febrero arrojó  $R^2 = 0,13$  lo que representa una equivalencia del 13% con respecto a los datos de las estaciones de calidad de aire, estos resultados representan que los datos obtenidos no son buenos indicadores de la realidad del estado del aire para estos días, sin embargo, si se comparan con estudios realizados, no se encuentran muy distantes de un umbral que se considere positivo para resultados obtenidos en este tipo de estudios (Wang et al, 2010(b); Can et al, 2011).

Respecto a los resultados restantes, que representan al 60,8% de la muestra del año 2011, es posible observar que se obtuvieron datos que superan por mucho el 50% de equivalencia con respecto a los datos medidos por las estaciones, esto indica que los resultados obtenidos son una buena representación de la realidad para estos días de estudio, por ello, son fuente de información confiable para llevar a cabo análisis de calidad de aire multitemporal, como es el caso de esta propuesta metodológica.

**Tabla 17.** Productos obtenidos de regresiones lineales para el año 2012

Día Juliano	Fecha	Ecuación Lineal	R2
1	ene-01	$Y = 0,4376x + 23,575$	0,4664
7	ene-07	$Y = -28,714x + 829,29$	1
9	ene-09	$Y = 2,633x + 37,073$	1
16	ene-16	$Y = 0,3133x + 9,5352$	0,8058
25	ene-25	$Y = 0,384x + 24,767$	0,9905
27	ene-27	$Y = 2,1232x - 56,035$	0,9337
32	feb-01	$Y = 0,257x + 23,562$	0,4779
33	feb-02	$Y = 0,9637x + 14,94$	1
45	feb-13	$Y = 0,1757x + 17,688$	0,5254
46	feb-14	$Y = 0,809x + 9,6171$	0,7245

<b>48</b>	feb-16	$Y = 1,1541x - 22,054$	0,3542
<b>64</b>	mar-04	$Y = 0,6412x - 9,9412$	0,5150
<b>68</b>	mar-08	$Y = 0,2072x + 11,074$	0,9235
<b>71</b>	mar-11	$Y = -0,9694x + 78,159$	0,9993
<b>73</b>	mar-13	$Y = 1,1211x - 18,152$	0,5259
<b>75</b>	mar-15	$Y = 0,3569x + 2,7564$	0,9614
<b>93</b>	abr-02	$Y = 4,7336x - 164,96$	0,5244
<b>114</b>	abr-23	$Y = 0,2034x + 5,0188$	0,5840
<b>116</b>	abr-25	$Y = 0,4563x + 2,1101$	0,9646
<b>121</b>	abr-30	$Y = 0,4605x + 14,026$	0,5125
<b>123</b>	may-02	$Y = 0,42x + 7,3034$	0,9788
<b>139</b>	may-18	$Y = 0,1936x + 17,198$	0,6679
<b>150</b>	may-29	$Y = 1,128x - 32,528$	0,7470

De la Tabla 17 es posible observar que para el año 2012 se presentó un caso menos de  $R^2 = 1$  que en el 2011, recalando que este valor de  $R^2$  es indicador de escasos de datos para validar los resultados obtenidos a partir de las imágenes MODIS, lo que supone una incertidumbre acerca de la veracidad de dichos datos, por ende, es posible afirmar que los datos obtenidos del año 2012 se encuentran con menor umbral de incertidumbre.

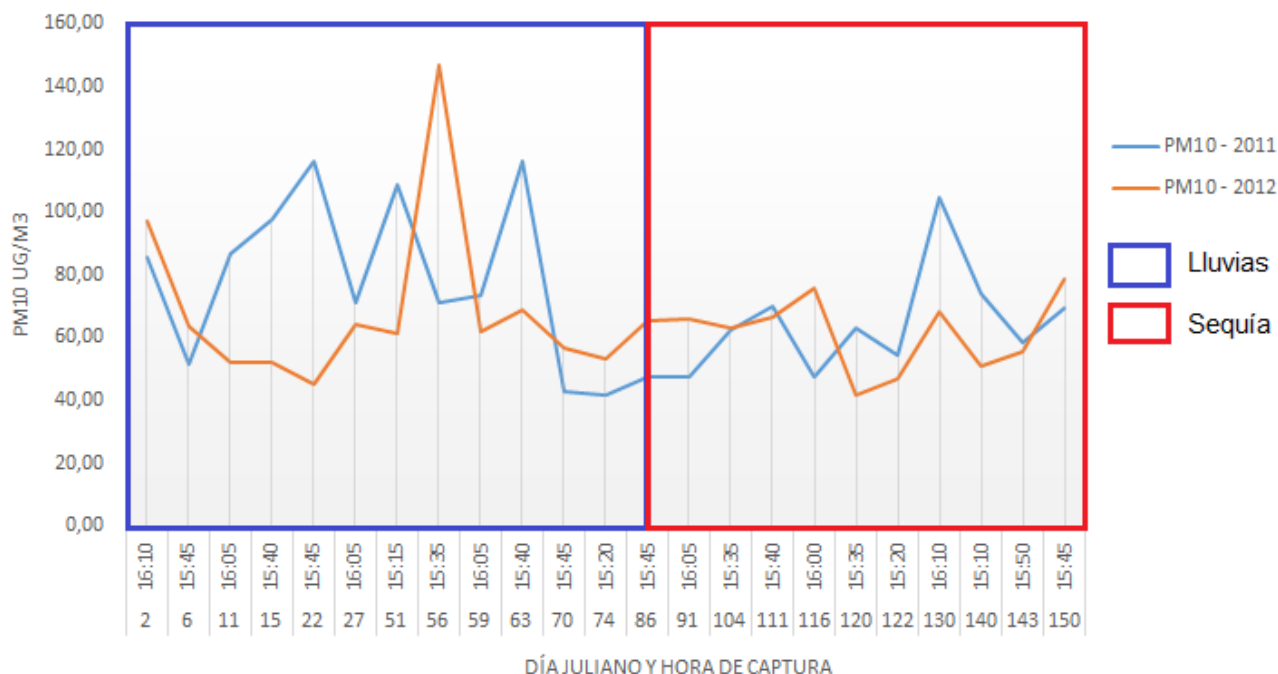
Es destacable también que para el año 2012 el indicador de validez más bajo fue un  $R^2 = 0,35$  lo que supone un aumento del 10% frente al indicador más bajo obtenido en el año 2011. De los resultados restantes el 69,5% de los datos del cálculo de PM10 con imágenes tuvo una equivalencia por encima del 50% con respecto a los datos medidos de las estaciones en tierra, lo que supone un aumento del 9% frente a los resultados obtenidos para el año 2011. De esta forma, las cifras obtenidas para el año 2012 representan resultados más alentadores frente al año 2011, lo que reduce el grado de incertidumbre acerca de la validez de las concentraciones de PM10 calculadas por medio de las imágenes MODIS.

Después de mostrar los porcentajes de correlación obtenidos, y mencionar que en su mayoría han sido resultados que concuerdan con la realidad, no es suficiente para argumentar que dichos resultados realmente son satisfactorios o no, para ello, se llevará a cabo una discusión en la próxima sección de este documento en torno a los estándares definidos por estudios realizados, los cuales suponen un punto de referencia no sólo en el aspecto teórico de este estudio, sino también, respecto a los productos resultantes.

Entre tanto, dado que la zona de estudio presenta dos tipos de situaciones climáticas como lo son periodos de lluvia o humedad y periodos de sequía, la Figura 29 muestra la relación entre los datos obtenidos para el año 2011 y 2012 con respecto a los periodos de

variabilidad climática mencionados, donde, desde el mes de enero hasta el mes de marzo se presenta fenómeno de la niña, equivalente a lluvias para esta zona de estudio, y para los meses de abril y marzo se presenta fenómeno del niño, situación equivalente a sequía o periodos de verano intensos (OSSO, 2012).

**Figura 29.** Relación de la dinámica del PM10 de Enero a Mayo en los años 2011 y 2012 con respecto a los periodos de variabilidad climática de la zona de estudio.



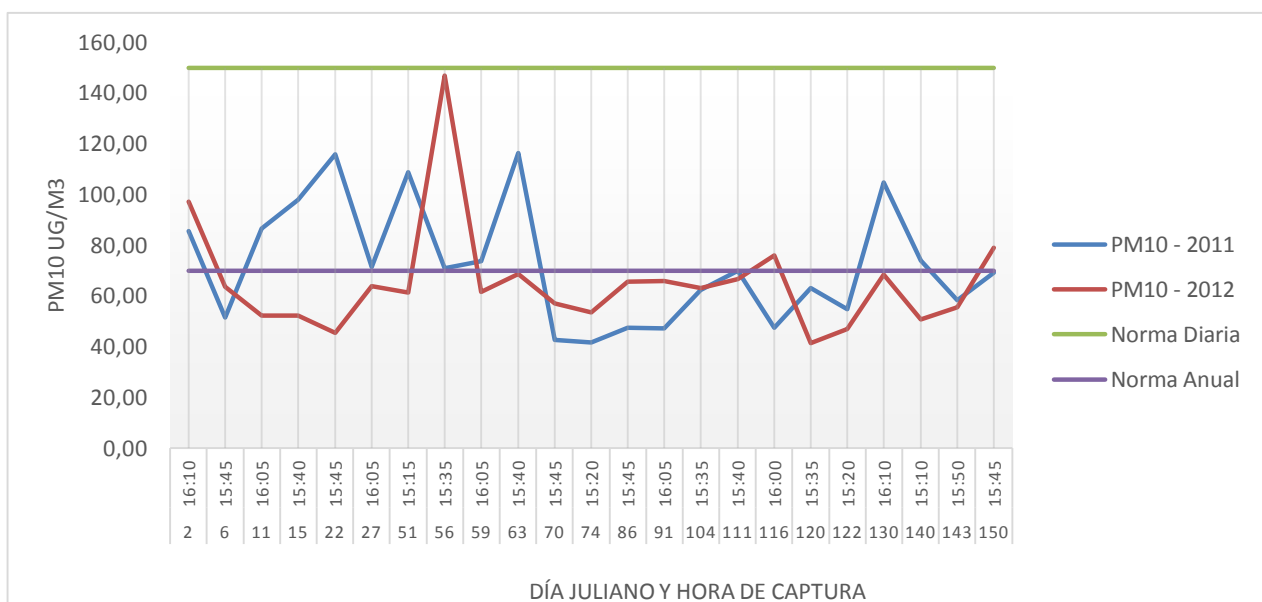
De la Figura 29, donde la información de la variabilidad climática se obtuvo del Observatorio Sismológico de Occidente OSSO (2012), se observa que para los periodos de lluvia se tiene una mayor tasa de PM10 en comparación con los dos meses presentados de periodo de sequía, situación que indica que en la zona de estudio la calidad de aire tiende a ser más vulnerable en el periodo de presencia del fenómeno de La Niña donde se encuentran índices de contaminación más elevados.

Ahora bien, a partir del mes de Junio de los años 2011 y 2012, se propiciaron dos de los eventos de lluvias más extremos para la situación climática nacional (OSSO, 2012), razón por la cual sólo se utilizaron datos hasta el mes de mayo para ambos años, pues en los meses restantes debido a estas condiciones climáticas sólo se tenían imágenes cubiertas por nubosidad. Entonces, según los resultados que se han presentado se puede sugerir que para estos periodos no analizados, ocurrió una situación similar con respecto a la calidad del aire, sin embargo, las herramientas, datos, y resultados obtenidos a partir de

esta investigación no dan lugar a análisis de simulación, o predicción de calidad de aire a partir de datos meteorológicos; los alcances de este estudio se limitan a evaluar la dinámica de PM<sub>10</sub> según las condiciones del momento de captura de las imágenes, por ello, sólo se indica esta idea como una sugerencia.

Para concluir con esta sección es importante analizar el estado en que se encuentra la calidad de aire de la zona de estudio en comparación con las normas vigentes que regulan la contaminación atmosférica, para ello en la Figura 30 se presenta una comparación de los resultados obtenidos con la norma anual (línea horizontal lila) y la norma diaria (línea horizontal verde), ambos con valor máximo permitido, en la cual se observa como la norma anual se rompe en más de una ocasión, violando el límite permisible por la EPA dictado en 1990, el cual permite un exceso al año.

**Figura 30.** Relación de la dinámica del PM<sub>10</sub> de Enero a Mayo en los años 2011 y 2012 con respecto a la normatividad de calidad de aire



Para el caso de la norma diaria es posible observar que no ha sido propasada en ninguna ocasión, lo que indica que de acuerdo a la temporalidad aplicada para este estudio los resultados se ajustan a la normativa, ya que el análisis realizado se encuentra evaluando la concentración de PM<sub>10</sub> en condiciones diarias vistas en un conjunto que representa una serie de tiempo. Para lograr un análisis respecto a la norma anual, se requiere adicionar mayor cantidad de información con el fin de estimar un promedio más ajustado a la realidad en el cual pueda ser confrontado con dicho nivel anual.

## 7.6. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN EN AIRVIRO

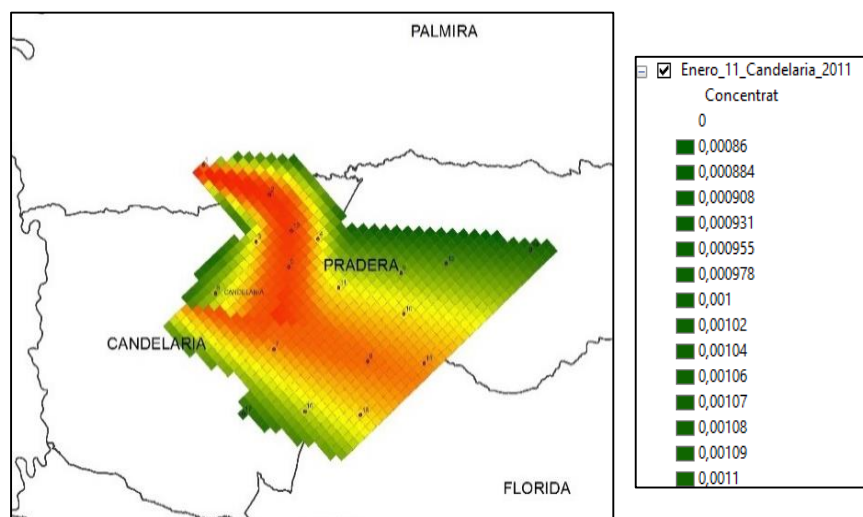
Después de validar los resultados obtenidos con el producto MODIS, el paso siguiente es estimar la influencia que tiene la quema de caña de azúcar en la calidad de aire de la zona de estudio, esto a través de la modelación de escenarios que representen el comportamiento que tiene una quema, que para efectos del proyecto coincida en fecha y horario con la captura de las imágenes satelitales utilizadas. Para ello, se utilizó el sistema web para la gestión de la calidad del aire *Airviro*, con el que se modelaron 12 escenarios diferentes de dispersión.

El resultado que arroja una modelación de quema realizada en este sistema, es un polígono o área de influencia que representa la distribución espacial de la emisión de PM<sub>10</sub>, según condiciones meteorológicas suministradas. Esta a su vez, requiere cierta cantidad de datos asociados a una tabla de atributos los cuales afinan los resultados según las condiciones específicas de la zona de estudio.

De la modelación resultante se obtiene la tasa de emisión de quema de caña, esta tasa de emisión se expresa en unidades de g/s, esto indica el peso de PM<sub>10</sub> que es emitido por cada segundo durante el tiempo que se realice la quema evaluada.

Airviro permite la exportación de los datos generados a diversos formatos de archivos, uno de estos es SHX (Shape File). Por consiguiente, cada polígono generado fue exportado a SHX, la Figura 31 presenta un polígono de distribución de quema con la respectiva leyenda que responde a la tasa de emisión, visualizado en la plataforma Arcgis.

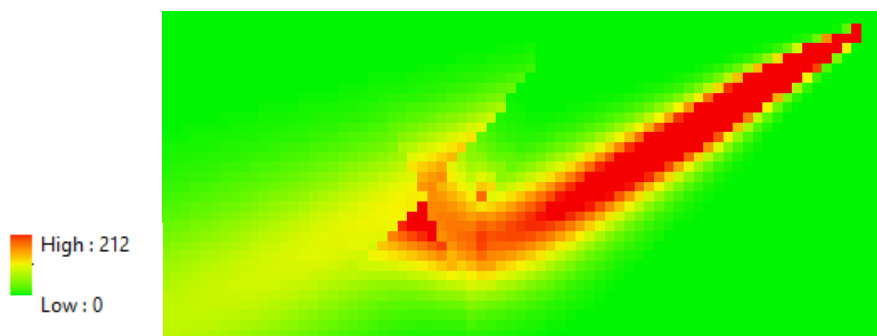
**Figura 31.** Dispersión de tasa de emisión de quema de caña generada en AIRVIRO





Con el propósito de estimar si en las zonas donde la tasa de emisión de quema es elevada existe coincidencia con niveles altos de PM10, se exportó cada polígono a formato raster, compatible con los datos obtenidos del producto MODIS. La Figura 32 representa un polígono de tasa de emisión en formato raster, donde se puede observar claramente la dispersión que alcanza la quema, donde las tonalidades rojas y amarillas corresponden a niveles de emisión diferentes de 0, entonces, con los límites de la dispersión claramente definidos se creó una máscara con el propósito de extraer exactamente esta misma zona del raster de concentración de PM10 obtenido con el producto MODIS. Ahora bien, con estos nuevos conjuntos de datos se partió de la idea de que cada uno puede ser evaluado como una superficie, tal como lo es la corteza terrestre, a partir de este planteamiento se generaron curvas de nivel para cada conjunto de datos, con esto se abrió la posibilidad de crear perfiles para evaluar el comportamiento de cada una de estas superficies y compararlas a la vez, dichos perfiles se trazaron de acuerdo a la distribución espacial de la tasa de emisión más alta por modelación realizada.

**Figura 32.** Dispersión de quema de AIRVIRO en formato



Adicionalmente, para contrastar frente a la zona en la que se distribuye la emisión de la quema, se seleccionó una zona aledaña en la que no se presenta quema para ese momento; de esta manera se obtienen 3 escenarios, por evento de quema, que permiten evaluar si el comportamiento de la calidad del aire responde a un patrón de comportamiento de la emisión generada por la quema o si se presentan como fenómenos independientes, por esta razón el hecho de que los datos de la modelación presenten unidades de g/s y los datos obtenidos con el producto MODIS presenten unidades de  $\mu\text{m}^3$  no afecta el análisis realizado.

Según los reportes de cosecha de caña de azúcar, otorgados por la corporación autónoma regional de Valle del Cauca – CVC. para el día 11 de Enero del 2011, a partir de las 15:35 horas hasta las 16:05 horas, en el municipio de Candelaria se realizó una quema, ya que la imagen correspondiente a este día se capturó a las 16:05, son datos propicios para ser analizados. A través de los perfiles de muestra se extrajeron los datos de los píxeles

correspondientes en los tres escenarios, en la Tabla 18 se presentan los valores obtenidos según la distancia acumulada en kilómetros la cual corresponde a la distancia en la que se ha dispersado la emisión de la quema según la modelación realizada.

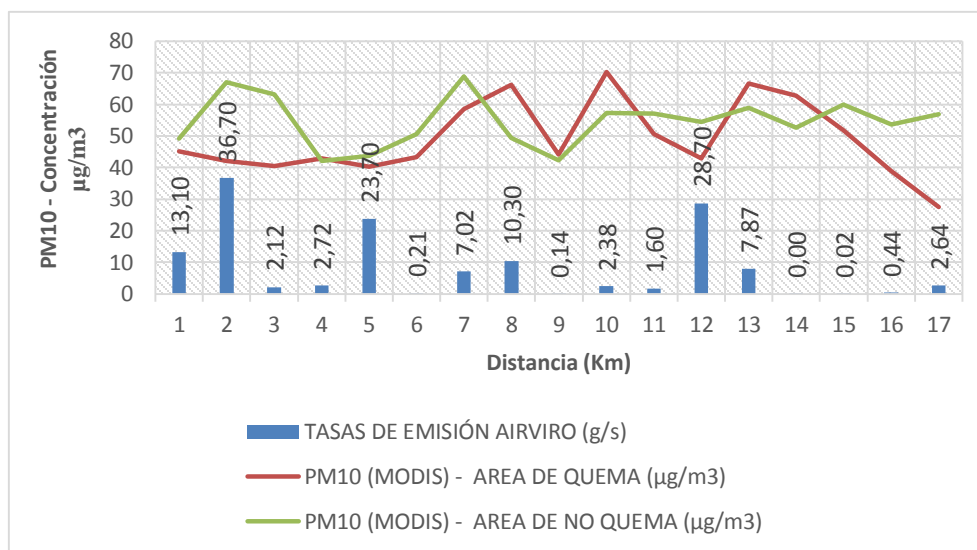
**Tabla 18.** Datos AIRVIRO y MODIS de Enero 11 del 2011.

DISTANCIA(Km)	TASAS DE EMISIÓN AIRVIRO (g/s)	PM10 (MODIS) - AREA DE QUEMA (µg/m3)	PM10 (MODIS) - AREA DE NO QUEMA (µg/m3)
1	13,1	45,06	49,27
2	36,7	42	67,03
3	2,12	40,49	63,22
4	2,72	42,8	42,05
5	23,7	40,23	43,79
6	0,21	43,3	50,494
7	7,02	58,56	68,92
8	10,3	66,19	49,35
9	0,14	44,18	42,35
10	2,38	70,215	57,33
11	1,6	50,53	57,02
12	28,7	42,8	54,42
13	7,87	66,59	58,98
14	0,00275	62,66	52,52
15	0,02	51,78	59,9
16	0,44	38,9	53,56
17	2,64	27,54	56,81

La Tabla 18 está compuesta por los datos de cada uno de los pixeles de los tres escenarios estudiados, de la que se puede observar como los valores de la tasa de emisión de la quema modelada presenta un rango de datos menor que los valores obtenidos con el producto MODIS, sin embargo, en aquellos puntos donde la tasa de emisión de la quema es más baja los valores de PM10 para esta misma zona son los más elevados, un ejemplo claro de esto corresponde al Km 17, en el que el valor más bajo de la tasa de emisión de la quema modelada corresponde a uno de los valores más altos de PM10 extraído de la misma

zona del producto MODIS, por otra parte, en la zona de muestra donde no se presentó quema se puede observar como los valores son altos si se le compara frente a los valores de la tasa de emisión. Además, es posible observar como los datos del producto MODIS correspondientes a zona de quema y a zona de no quema presentan un comportamiento similar, en la Figura 33 se relaciona el perfil de datos obtenidos de la Tabla 18, en la que se representa el comportamiento de los tres escenarios analizados.

**Figura 33.** Perfil comparativo para Enero 11 del 2011

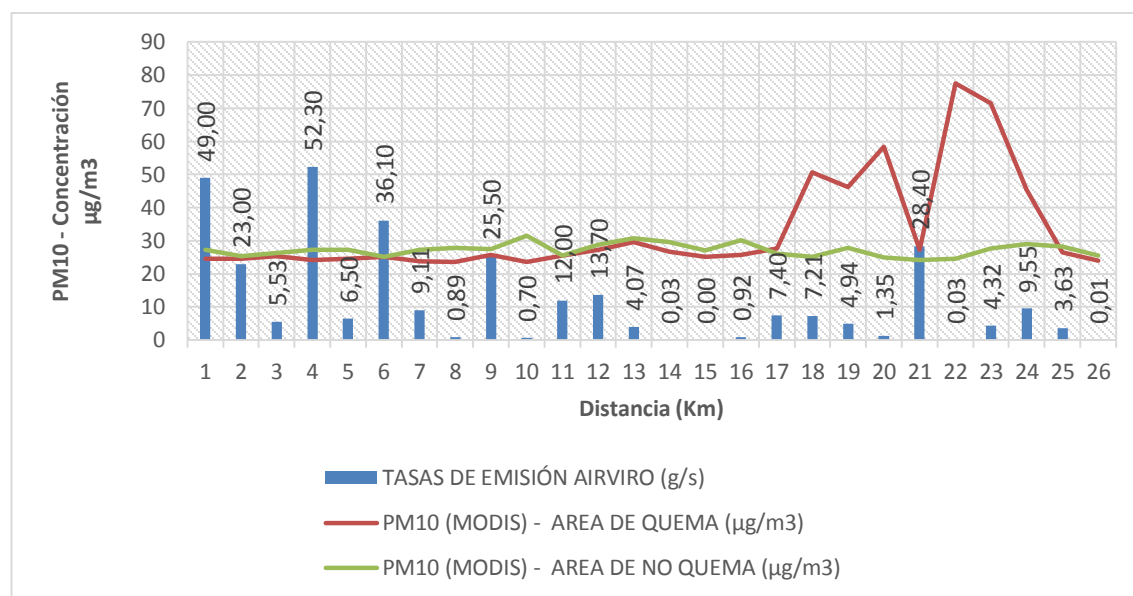


En la Figura 33 es posible observar que el eje horizontal corresponde a la distancia en la que se distribuye la emisión producida por la quema, mientras que el eje vertical corresponde a la tasa de emisión en el caso de las barras de color Azul, y a la concentración de PM10 en el caso de las líneas de color verde y rojo. Los valores para el eje vertical representan la concentración de PM10 para los datos extraídos de los productos MODIS, mientras que las etiquetas de las barras representan los valores de la tasa de emisión generados por la quema. Por consiguiente, en la Figura 33 se puede observar como estos fenómenos son eventos independientes, con algunas coincidencias de actitud en un intervalo desde el Km 7 al 11. La situación que representa esta Figura indica que la tasa de emisión producida por esta quema modelada no es un factor determinante en el comportamiento del PM10 para este evento en particular.

Partiendo del análisis inicial se llevó a cabo el mismo procedimiento para las modelaciones restantes, por practicidad se agruparon los perfiles correspondientes a cada modelación por mes, de dichas agrupaciones se destacaron los resultados más importantes y cada una de sus particularidades, mientras que las imágenes de distribución de quema podrán ser

revisadas en el anexo D. Inicialmente la Figura 34 presenta el perfil correspondiente a la modelación realizada para el día 27 de Enero del 2011.

**Figura 34.** Perfil comparativo para Enero 27 del 2011

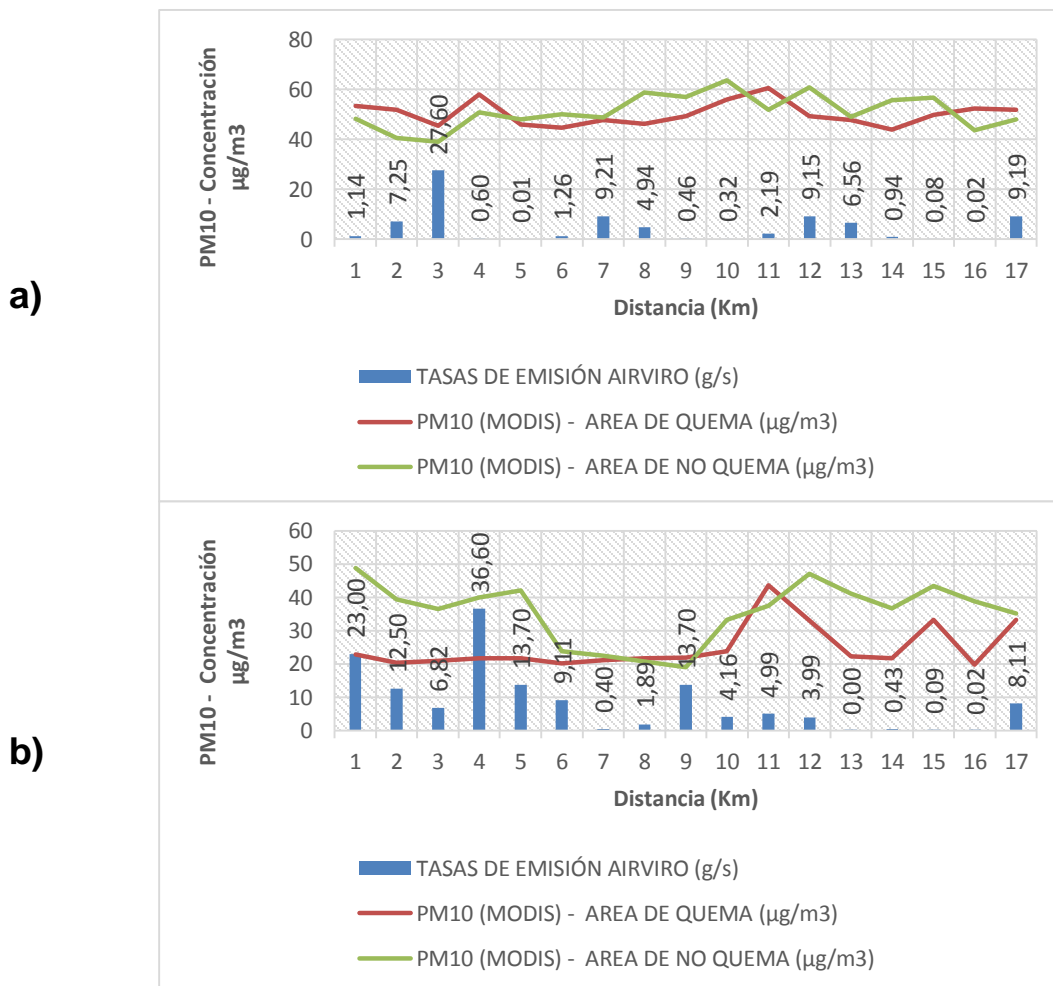


A través de la Figura 34 es posible observar como el área de quema y el área de no quema presentan una actitud similar, y en estado constante a través de la distancia en la que se ha dispersado la quema realizada el 27 de Enero, según los datos obtenidos con la modelación. A diferencia de los datos de concentración de PM10, la tasa de emisión producida por la quema presenta un comportamiento variable que tiene una tendencia decreciente, diferente si se le compara frente a los datos MODIS de concentración, pues la línea roja que representa el área de quema, tiene una tendencia creciente, mientras la línea verde que representa una zona neutra sin quema, tiene una actitud muy lineal en su distribución espacial. Por consiguiente, es posible plantear la hipótesis de que en esta situación la quema no presentó mayor influencia sobre el contenido de PM10 en el momento del análisis, esto puede decirse ya que si se observa el comportamiento de cada uno de los 3 escenarios, los datos de concentración no responden a un patrón de movimiento con el que se les pueda vincular a la tasa de emisión producida por la quema.

De la misma forma, en la Figura 35 que representa los perfiles comparativos para el mes de Febrero, revisando el componente a), es posible observar como las líneas correspondientes a la concentración de PM10 responden a un comportamiento constante y similar a través de la distancia de dispersión que se obtuvo según la modelación para este día, mientras que la tasa de emisión producida por la quema presenta variaciones más

representativas, esto indica que para esta fecha a pesar de las alzas de la emisión generada por la quema, la concentración de PM10 se mantuvo constante, casi en equilibrio con respecto a los lugares donde no se presentó quema; por lo tanto, se da lugar para afirmar que la concentración de PM10 no responde a un patrón de comportamiento vinculado a la tasa de emisión generada por la quema modelada.

**Figura 35.** Perfiles comparativos para Febrero del 2011, a) febrero 20 del 2011; b) febrero 28 del 2011

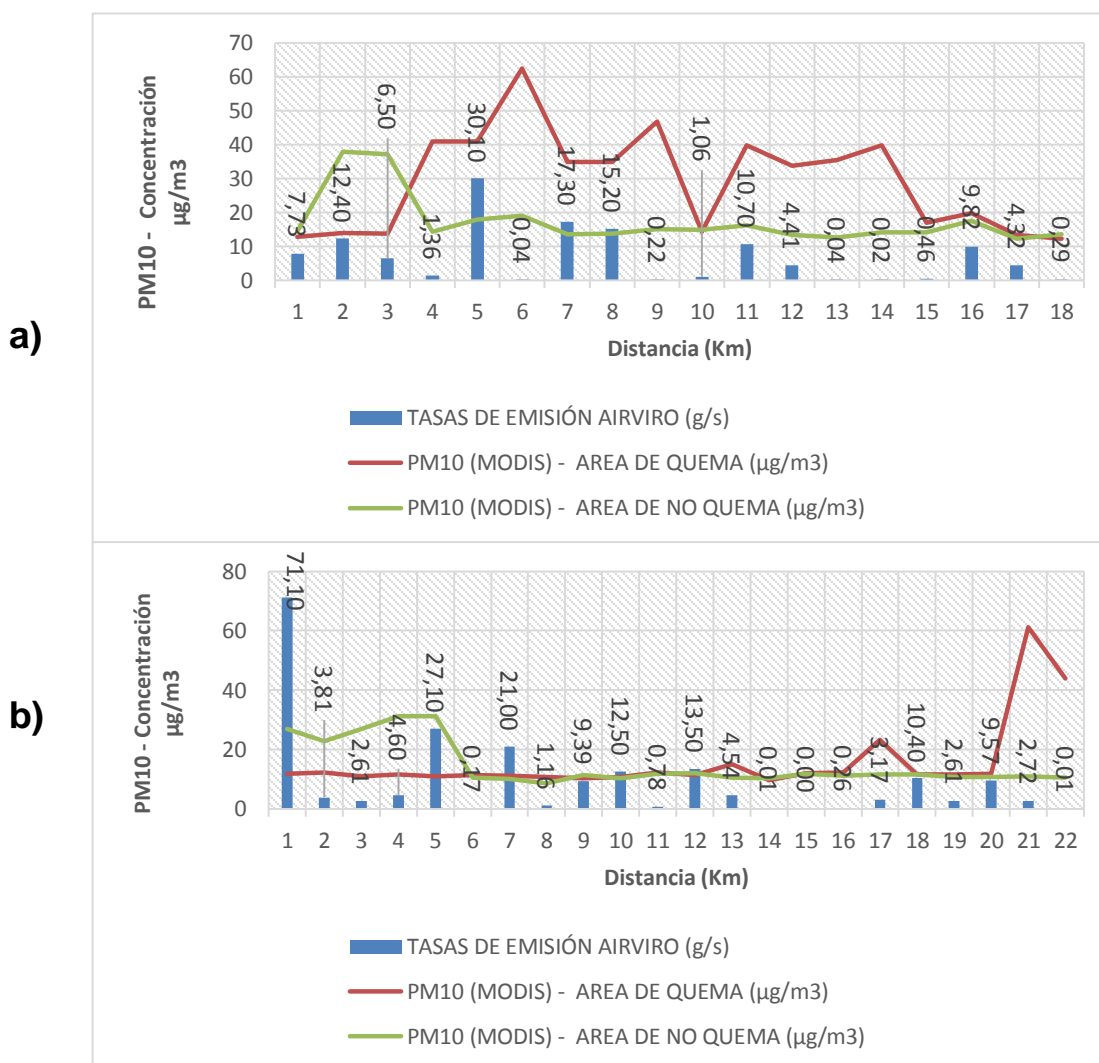


Mientras que en el componente b) de la Figura 35 se puede observar como en ninguno de los tres escenarios existe una relación fuertemente marcada en el comportamiento, excepto por algunas particularidades como la actitud creciente de las líneas verde y roja que muestran cómo se incrementó la concentración de PM10 casi al punto más lejano en el que se dispersó la tasa de emisión producida por la quema. A parte del punto mencionado, puede decirse que estas tres muestras de datos tienen comportamientos aleatorios sin

ningún patrón en común, lo que representa en términos del análisis realizado que la tasa de emisión no provocó una influencia tan significativa como para dirigir la actitud de la concentración de PM10.

Uno de los resultados obtenidos para el mes de Marzo presentó un comportamiento diferente de los meses de Enero y Febrero, el componente a) de la Figura 36 que presenta la modelación para una quema realizada el día 11 de Marzo, manifiesta por primera vez un vínculo entre la actitud de la tasa de emisión y la concentración de PM10, donde se puede observar como varía el valor de concentración en la zona donde se realizó la quema, de manera proporcional a la tasa de emisión.

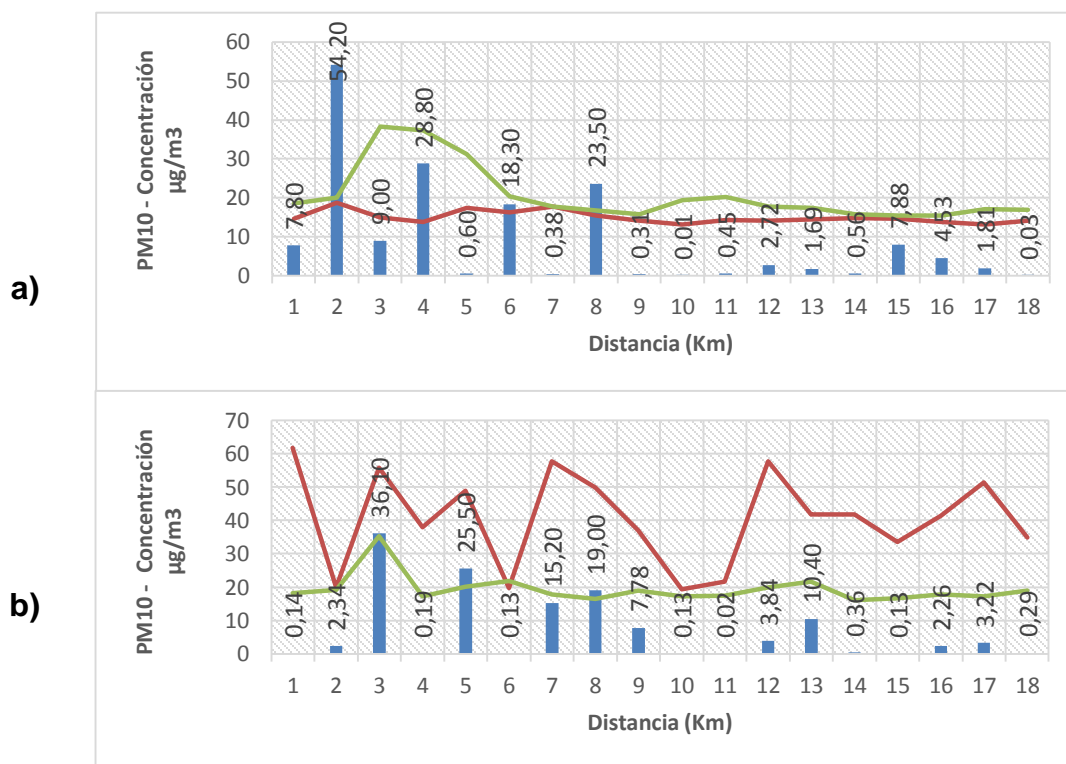
**Figura 36.** Perfiles comparativos para Marzo del 2011, a) Marzo 11 del 2011; b) Marzo 15 del 2011



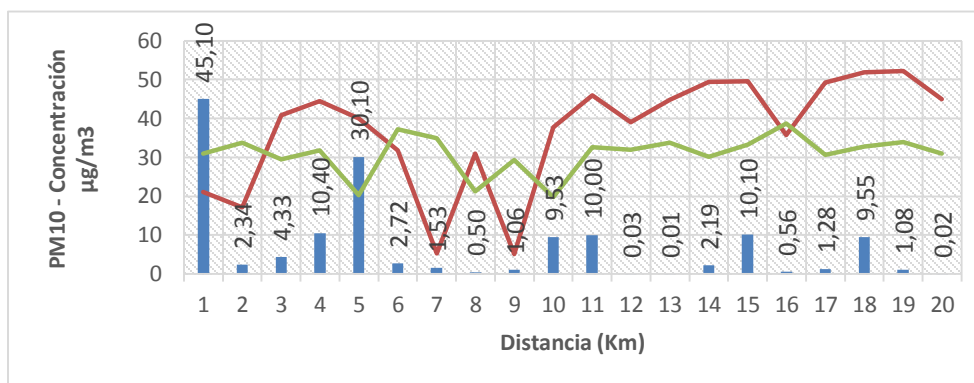
Esta relación directamente proporcional que se presenta entre la tasa de emisión y la concentración de PM10, sólo se ve comprometida en una oportunidad y es en el Km 6 donde hay disparidad en los valores de estos dos escenarios, sin embargo, omitiendo este único dato atípico, puede afirmarse que este resultado indica la influencia que ejerció la tasa de emisión sobre la concentración de PM10 para esta oportunidad. Además, los resultados que representa el componente b) de la Figura 36 se asemejan a los obtenidos para los meses de Enero y Febrero, donde se encuentra que la única relación que existe entre los tres escenarios es la similitud entre la actitud de la concentración de PM10 en la zona de quema y en la zona de no quema.

Por otra parte, en la Figura 37 el componente b) presenta nuevamente una relación entre el comportamiento de la tasa de emisión y la concentración de PM10, es posible observar

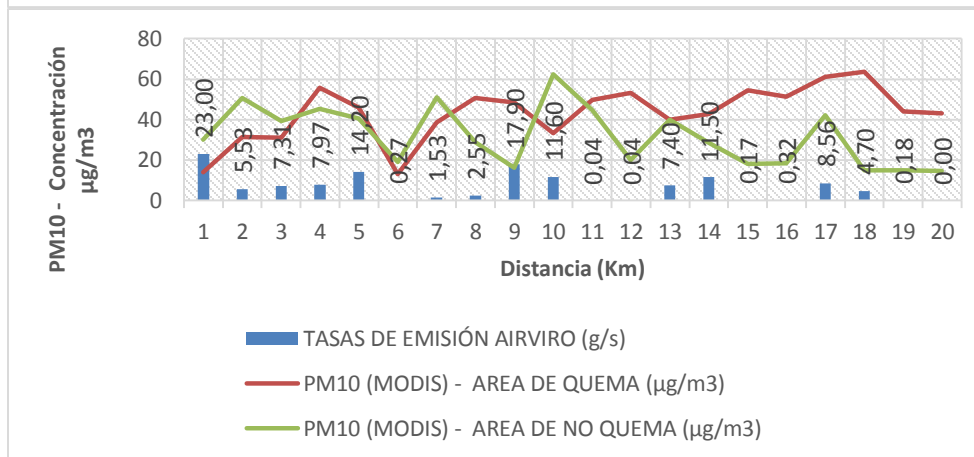
**Figura 37.** Perfiles comparativos para Abril del 2011, a) Abril 01 del 2011; b) Abril 14 del 2011; c) Abril 21 del 2011; d) Abril 26 del 2011.



c)



d)



Como la concentración de PM10 para el área que cubre la quema varía de acuerdo a patrón de comportamiento que sigue la tasa de emisión modelada, a partir de esto es posible afirmar que para esta situación la tasa de emisión generada por la quema tuvo influencia proporcional sobre la concentración de PM10 en la zona evaluada, además de esto, cabe destacar otra particularidad del componente b) y es que la línea verde que corresponde a una zona aledaña donde no se presentó quema, también se encuentra regida por el comportamiento de la tasa de emisión, sin embargo, es posible observar que para este escenario los niveles de PM10 son menores en relación con la zona de quema, con base en estas particularidades se abre la posibilidad para plantear que la quema es la principal influencia sobre la concentración de PM10 y su comportamiento, según la situación evaluada para el día 14 de abril del 2011.

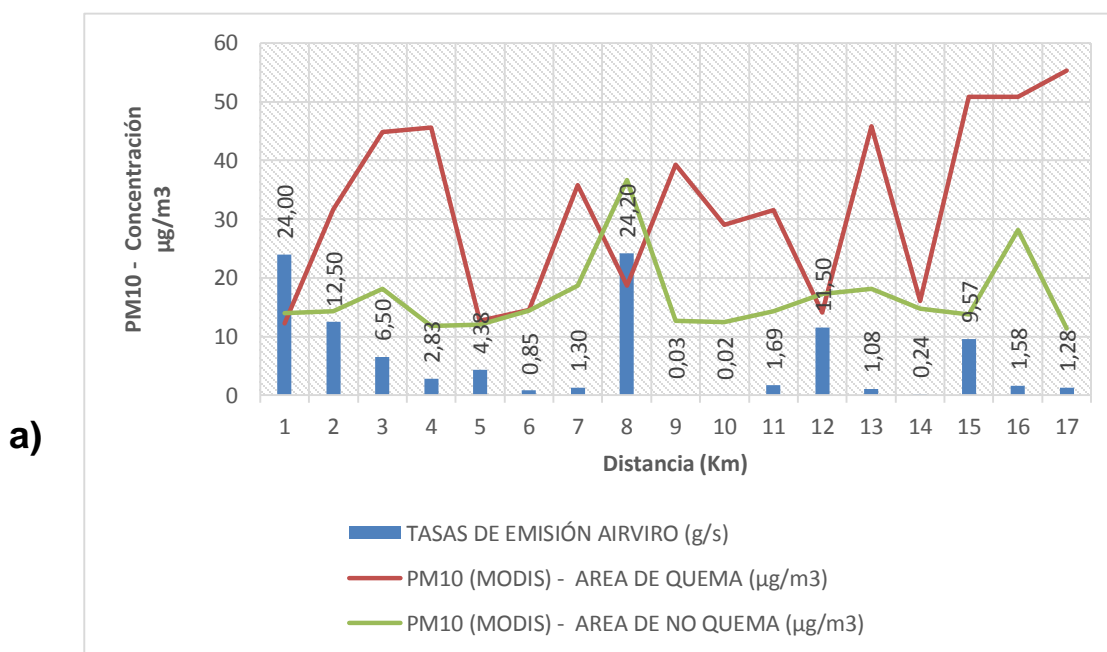
Los componentes restantes de la Figura 37 para el mes de abril, por el contrario no presentan resultados que indiquen relación entre los escenarios analizados, salvando algunas coincidencias del componente d) los resultados muestran aleatoriedad en el comportamiento de la tasa de emisión y de la concentración de PM10.



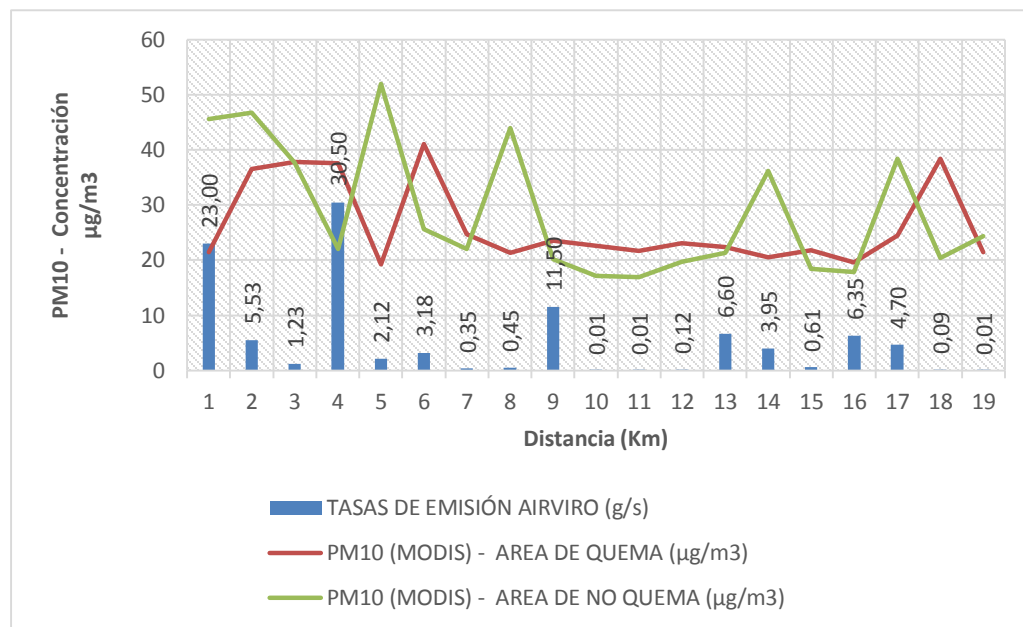
Por otra parte, la Figura 38 presenta los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas para el mes de Mayo, de este mes se lograron dos modelaciones de las cuales se puede afirmar no se presentó ninguna relación de comportamiento para los escenarios evaluados, la actitud de la concentración de PM10 fue un fenómeno independiente de la variabilidad de la tasa de emisión en cada uno de los componentes de la Figura 38.

Con el mes de mayo se concluyen los resultados obtenidos de modelar quemas a través de la plataforma *Ariviro*, de los cuales se puede afirmar que el método de análisis planteado permitió identificar que en algunas situaciones la estabilidad de la concentración de PM10 es un factor dependiente de la variabilidad de la tasa de emisión que se produce por una quema de caña, sin embargo, la actitud predominante para los resultados anteriormente expuestos indica que en la gran mayoría de casos, casi el 80% para este caso, estos fenómenos ocurren como eventos independientes, y es que además de la quema de caña existe otros factores que intervienen en la calidad del aire (De la Pava *et al.*, 2008; Alvarez, 2007), tales como la erosión, la combustión de elementos fósiles, el transporte químico, y sin lugar a dudas los factores climatológicos como el viento, la lluvia, la temperatura, entre otros.

**Figura 38.** Perfiles comparativos para Mayo del 2011, a) Mayo 23 del 2011; b) Mayo 30 del 2011



b)



## 8. DISCUSIÓN

Una forma de mostrar la importancia de los resultados obtenidos es realizando una comparación con los resultados de otros estudios obtenidos. Por ejemplo, el estudio realizado por Wang *et al.*, en 2010(b) en la ciudad de Beijing, en el que se calculó PM10 a través del producto MOD04 de MODIS y se comparó con estaciones de medición en tierra, este proyecto tuvo resultados con equivalencia del 35% lo que significa que tuvo un  $R^2 = 0,35$ ; debido a que la metodología aplicada para ese estudio radicaba en mejorar los resultados obtenidos por imágenes mediante el uso de variables meteorológicas, esa mejora incrementó la equivalencia de sus resultados hasta un 56% lo que significa un  $R^2 = 0,56$ .

Tras aplicar una metodología que mejora los resultados obtenidos del estudio mencionado anteriormente se puede afirmar que esta mejora fue significativa, sin embargo, no supera los resultados obtenidos de este caso particular, esto puede ser argumentado debido a dos factores claves; en primer lugar, la ciudad de Beijing supera muy por encima el área de la zona del presente estudio, y finalmente esa diferencia de tamaño y de resolución espacial del tipo de imagen utilizada, hace que se pierda detalle de los datos debido a la generalización de la información por cada pixel, además de esto, la nubosidad juega un papel importante, pues dado que el pixel del producto MOD04 (producto utilizado por Wang

*et al.*, (2010(b)) en la ciudad de Beijing) es de 10Km x 10 Km, se tiene que la generalización de información por pixel incluye la nubosidad de la zona, y como se apreció en esta sección de resultados, la nubosidad influye en los resultados obtenidos.

Otro ejemplo para dar un punto de comparación a los resultados obtenidos de este caso particular, es el estudio realizado por Can *et al.*, (2011), aplicado para algunas regiones de Asia donde se compararon datos de AOT MODIS y datos de AERONET con respecto a estaciones de medición de PM<sub>10</sub> en tierra, donde se tuvieron, según las calificaciones de los autores, equivalencias escasas que variaban entre 10% y 40%, estos resultados los obtuvieron los autores tras aplicar regresiones lineales a los resultados obtenidos, tomando como variable independiente, al igual que este caso particular de estudio, los datos de las estaciones de PM<sub>10</sub> en tierra. En situación similar, con el caso de Wang *et al.*(2010(b)), los autores aplicaron mejoras a sus resultados utilizando regresiones no lineales para relacionar los datos obtenidos con variables meteorológicas, el resultado de este proceso fue un incremento de hasta el 65% de equivalencia lo que significa un  $R^2 = 0,65$ , en comparación con los datos de las estaciones. Cabe mencionar que el caso Can *et al.*(2011), también está sujeto a las condiciones que presenta el hecho de usar el producto AOT de MODIS debido a la resolución espacial y a las grandes áreas de estudio utilizadas, por otra parte los datos de AERONET también tienen resoluciones continentales que llegan al igual que el producto AOT hasta los 10Km x 10Km.

En la región de los Alpes en Europa Emili *et al.*, (2010) llevando a cabo un estudio similar a los dos casos mencionados anteriormente, en el que también implementó el uso de variables climatológicas para mejorar resultados de PM<sub>10</sub> calculados a través de imágenes obtenidas del sensor SEVIRI y MODIS, tuvo coeficientes de correlación  $R^2_{sev} = 0,7$  y  $R^2_{MODIS} = 0,6$ , respectivamente. En este caso los resultados presentaron una mejora mucho más significativa que en los casos anteriores, situación que sugiere que el sensor SEVIRI, puede ser una propuesta atractiva también para este tipo de estudios relacionados a la medición de calidad de aire. Otro factor que puede influir en los resultados, es que la zona de estudio de este estudio referente está situada en una región montañosa, mientras que el caso de estudio particular, es una región plana con un promedio de altura de 1Km sobre el nivel medio del mar.

Finalmente, es necesario comparar con los resultados obtenidos en el estudio de Othman *et al.*(2010), aplicado a la región de Makkah en Arabia Saudita, donde se utilizó imágenes del sensor Landsat 7ETM+ con una resolución espacial de 30m. El objetivo del estudio en mención era determinar la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> utilizando técnicas de sensores remotos, y compararlos con datos de PM<sub>10</sub> obtenidos con un gravímetro llamado DusTrack, el cual tiene la capacidad de medir la concentración de material particulado en cualquier región a ser utilizado pues es un instrumento portátil, que también fue utilizado por Behrentz *et al.* (2006) para la ciudad de Bogotá.

Los resultados que obtuvieron Othman *et al.* (2010), fueron sumamente alentadores pues la equivalencia más baja que obtuvieron fue del 80% para las dos imágenes Landsat que utilizaron en su estudio. El gran resultado que los autores tuvieron en su estudio puede ser explicado por dos razones, la fuente de datos de validación y la resolución espacial de las imágenes utilizadas, pues al contar con un medidor portátil de material particulado, no tienen restricción alguna de datos y confrontando con los 3 ejemplos anteriores es posible concluir que la resolución espacial juega un papel importante dentro del marco de las metodologías aplicadas para el cálculo de PM10.


Ahora bien, una vez se tiene que los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los autores consultados se puede plantear una explicación para el comportamiento que se tuvo de PM10 calculado en este estudio. Para ello y como se sugirió en la etapa de AOT, aquel comportamiento puede encontrarse asociado con la variabilidad climática de la zona de estudio.

## 9. CONCLUSIONES

De acuerdo a la confrontación de la metodología aplicada con otros estudios que han aplicado técnicas similares, se tiene que la resolución espacial de las imágenes utilizadas juegan un papel importante a la hora de verificar la validez de los resultados obtenidos con estos métodos, esto se debe a que el tamaño del pixel es un concepto que parte de la generalización de información por unidad de área, es decir, simplificar rasgos característicos de una zona en un único valor que en este caso es el valor digital del pixel.

Siendo que la principal metodología aplicada en el Valle del Cauca para la medición de la calidad de aire es a través de la implementación de una red de estaciones en tierra, en este estudio se utilizaron los datos de dicha red para validar los resultados obtenidos, sin embargo, sólo para un 49,38% de los días de estudio se pudo obtener información de utilidad, y según los resultados, en los días con mayor cantidad de datos se puede observar que la calidad de la correlación mejora, asegurando plenamente si el dato obtenido es acorde a la realidad o no, por ende los resultados obtenidos de las imágenes que no contaron con información suficiente, estarán sujetos a incertidumbre.

Según se presentó en los resultados, la red de calidad de aire presentó fallas para algunas estaciones, situación que generó falta de información para algunos días de estudio, sin embargo, cuando se obtuvieron datos de al menos 5 de las 7 estaciones empleadas, para el año 2011 el 61% de los días seleccionados para el estudio presentaron una equivalencia aproximada al 80% y para el año 2012 los datos presentaron una equivalencia aproximada al 70%, es decir, existe una compatibilidad de resultados entre la metodología empleada en



esta investigación y la metodología empleada actualmente para monitorear la calidad de aire, lo que implica que los resultados obtenidos con el producto MODIS ofrecen información confiable por cada uno de los píxeles que componen la imagen, reduciendo la incertidumbre por la interpolación que llevan a cabo las estaciones.

Estos resultados son alentadores, no sólo por la similitud con la fuente de información real sino por la superioridad de los mismos frente a estudios internacionales en los cuales se aplicaron metodologías similares, esto se logró a través del uso de datos con una resolución espacial más detallada en comparación de los demás estudios, y gracias al análisis multitemporal realizado, ya que otros estudios generalmente aplican este tipo de metodología para una única situación y con el fin de llevar a cabo distribución espacial del material particulado.

De acuerdo a los datos obtenidos de la validación, se tiene que las técnicas aplicadas en este estudio son una fuente prometedora de información para ser tomada en cuenta a la hora de llevar a cabo estandarizaciones de metodologías de medición de calidad de aire, puesto que no sólo se genera información acerca de PM<sub>10</sub> sino también información adicional de las condiciones atmosféricas de los lugares estudiados debido a la gran cantidad de factores meteorológicos que interactúan en la dinámica de la contaminación atmosférica. Así se comprueba el poder de la metodología empleada.

Una de las características que resalta en la zona de estudio es que los aerosoles atmosféricos presentan un comportamiento predominante de absorción de energía, según los periodos de tiempo seleccionados para el análisis. Por consiguiente, es posible afirmar que la atmosfera del corredor plano del Río Cauca es clasificada como una zona potencialmente poblada por partículas en suspensión de tipo fino, clasificación en la que entra el PM<sub>10</sub> como una de las partículas más comúnmente estudiadas por la comunidad científica a cargo del contexto meteorológico, esto según el panorama actual local e internacional.

Con los resultados obtenidos se logró generar una serie de tiempo para modelar la dinámica de PM<sub>10</sub> en una fracción del corredor plano del río Cauca, de la que se puede determinar un promedio diario de 68,80µg/m<sup>3</sup> para los días de estudio seleccionados, los cuales se comprenden entre enero y mayo para el año 2011 y para el año 2012. Estos valores se encuentran muy cerca de los límites permitidos, que según la normativa que regula la calidad de aire el límite diario permisible para la presencia de este contaminante es de 150µg/m<sup>3</sup>.

Así mismo, se tiene que el límite diario permisible se excedió un total de 14 veces entre los dos años de estudio, aun cuando según los estándares de la EPA sugieren que estos límites pueden ser excedidos tan solo una vez por año. El año que presentó un comportamiento más crítico fue el 2011, donde el límite fue excedido durante 10 veces en tan solo 5 meses,

donde cabe resaltar que el análisis realizado se llevó a cabo con imágenes captadas en el mismo horario debido a las características de translación del sensor MODIS, entonces los resultados obtenidos se encuentran condicionados a esta situación.

Según la serie de tiempo de PM<sub>10</sub>, los meses de Enero y Febrero tanto del 2011 como del 2012 presentaron comportamientos similares, para ambos años esta similitud coincide con la aparición del fenómeno de la niña, el cual para esta región se manifiesta con incremento en las lluvias, entonces, esto indica que en la zona estudiada y según los días analizados la variabilidad del PM<sub>10</sub> tiene relación directa en aumento con el alza en las lluvias y una disminución notoria en la aparición del fenómeno del niño, el cual se manifiesta con periodos de sol intensos y un alza en las temperaturas.

Según los resultados obtenidos con las técnicas de teledetección aplicadas, se tiene que es una rica fuente de información que representa una disminución de costos, así como una mayor cobertura espacial sin recurrir a métodos de interpolación para ganar información en grandes áreas como lo hacen las estaciones en campo, sin embargo, debido a la resolución temporal de los satélites y debido a las altas presencias de nubosidad en las imágenes, factor que representa pérdida de información, es imperiosamente necesario que estudios de este tipo siempre cuente con datos de fuentes como las estaciones de campo que sustenten sus resultados, puesto que a pesar de que con las imágenes se gana resolución espacial, es decir, algo aproximado a tener una estación de campo por pixel en la imagen, se pierde la resolución temporal de datos que poseen las estaciones en campo, ya que estas ofrecen datos en intervalos de tiempo de hasta minutos.

En lo que respecta a los detalles técnicos de esta investigación, el uso de una herramienta que permita llevar a cabo procedimientos de forma rápida y automática es esencial debido a la gran cantidad de datos que intervienen en este proceso, en este caso el uso del lenguaje de programación Python fue clave en el desarrollo de la propuesta metodológica.

Según los análisis realizados a los datos de tasa de emisión de la quema de caña, esta no representa un factor clave del incremento en la concentración total en la zona del valle geográfico del río cauca, pues los gráficos de influencia demuestran que los datos obtenidos por medio de las imágenes MODIS no sufren incrementos o decrementos relevantes en sus niveles de concentración PM<sub>10</sub>, esto quiere decir que aunque la quema de caña contribuye a la acumulación de material particulado en la zona de estudio, no es un evento que determine un patrón de comportamiento para la calidad de aire.

Tan solo en pequeños casos aislados específicamente en mes de Abril del 2011, se evidencia que la quema de caña y su tasa de emisión incrementa los valores de PM<sub>10</sub>.

## 10. RECOMENDACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

A pesar de la gran cantidad de imágenes utilizadas para este estudio, el uso de una galería de imágenes más amplia que permita tener una mayor cobertura mensual genera resultados mucho más aproximados a la realidad, además se tiene la flexibilidad de poder realizar análisis mucho más detallados a nivel temporal y de esta forma tener mayor detalle acerca de todas las variables que implica calcular concentraciones de PM<sub>10</sub>.


Según los resultados que se obtuvieron en este estudio, un factor que puede ser decisivo para analizar PM<sub>10</sub> u otro tipo de contaminante atmosférico, es la resolución espacial de las imágenes utilizadas, por ello, experimentar sinergias entre sensores con mayor resolución espacial como Landsat o Quickbird, puede tener una repercusión positiva en el detalle espacial a los resultados si es que la necesidad del estudio así lo demanda.

A pesar de que los resultados obtenidos de PM<sub>10</sub> fueron favorables aplicando la metodología vinculada a la normativa de calidad de aire, el uso de modelos más explícitos en función de esta variable puede proporcionar resultados mucho más precisos, de esta manera los resultados no se encuentran vinculados al ajuste de normativas, sino a las condiciones del ambiente y a las propiedades de este tipo de aerosol.

En vista de la relación que existe entre la meteorología y la contaminación atmosférica, en este caso PM<sub>10</sub>, para futuros estudios el uso de variables meteorológicas como humedad relativa, altura de capa de mezcla, temperatura de aire, entre otros; tiene una incidencia positiva en los resultados, ya que los aerosoles existen bajo condiciones determinadas por las variables mencionadas, el uso de estas variables puede brindar mayor detalle no solo de las cantidades existentes sino también de su distribución espacial.

Para validar los datos obtenidos de PM<sub>10</sub>, la exploración de fuentes de información juega un papel fundamental, puesto que entre mayor información se tenga disponible para este tipo de estudios se podrá explicar mejor la tendencia de los resultados obtenidos. Ahora bien, con relación a la fuente de datos utilizada, es importante que se creen cronogramas de mantenimiento y reparación de las estaciones que componen esta red, ya que no sólo para este estudio se presentó una limitación de este tipo, además, es la fuente de información para la región vallecaucana.

Bien sea para estudios atmosféricos o de otro tipo de cobertura, a la hora de llevar a cabo estudios multitemporales con imágenes satelitales, el uso de herramientas que automaticen los procesos tiene como resultado el incremento en la producción de información, además de la posibilidad de incorporar mayor cantidad de variables a los estudios realizados. Con ello, se reduce no sólo el trabajo manual de investigación sino también, la posibilidad de cometer errores en los procedimientos.



Es importante la definición de una metodología estandarizada para medir la calidad de aire, de esta forma todas las regiones pueden tener el mismo lenguaje de comunicación, y las fuentes de información serán mucho más generales y accesibles al público general, una opción muy atractiva para llevar a cabo una estandarización es el uso de herramientas geomática como la teledetección espacial.

Finalmente para la valoración de datos obtenidos por medio del sistema de modelación de calidad de aire Airviro, se evidencia la importancia de una excelente base de datos, ya que la calidad de esta influye de forma directa en el resultado. Para las simulaciones hechas en este estudio solo los parámetros básicos de modelación fueron utilizados, ya que solo se pretendía paralelizar resultados igualmente verídicos.

Ya que las imágenes de satélite poseen poca resolución espacial (1 kilómetro cuadrado) a diferencia de los modelos Airviro (6 metros cuadrados), mucha de información generada por el modelo gaussiano desapareció, pues fue necesario reducir su resolución espacial a 1 kilómetro cuadrado, para generar gráficos de influencia entre ambos, se recomienda para próximos estudios la utilización de insumos con mayor resolución espacial pues esto es una gran limitante en cuanto a veracidad de los datos se refiere.



## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, I., Chuvieco, E., & Salas, J. (2000). Comparación Estadística de Métodos Tradicionales de Interpolación e Imágenes NOAA-AVHRR para valorar peligro de Incendios. *Tecnologías Geográficas para el desarrollo Sostenible*, 185-199.
- Air Resources Board (ARB's). (7 de Noviembre de 2012). *california environmental protection agency. AIR RESOURCES BOARD*. Recuperado el Diciembre de 2012, de <http://www.arb.ca.gov/homepage.htm>
- Aldunate, P. P. (2006). Los efectos de la contaminación atmosférica por PM10 sobre la salud ciudad de La Paz – Bolivia. *Acta Nova*, 3(2), 422 - 442.
- Álvarez, E. D. (2007). La caña de azúcar: ¿una amarga externalidad? *Desarrollo y Sociedad*, 59, 117-164.
- Amanollahi, J., Makmom, A., Firuz, M., & Pirasteh, S. (2011). Real Time Assessment of Haze and PM Aided by MODIS Aerosol Optical Thickness over Klang Valley, Malaysia. . *World Applied Sciences Journal*. , 14, 8-13.
- Ambisalud. (2008). *Partículas en Suspensión*. Recuperado el 25 de 03 de 2012, de Ambisalud: <http://www.ambisalud.es/aire>
- Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y Control de Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales y Fracción Respirable PM10. *Luna Azul*(34), 195-213.
- Behrentz, E. R. (2006). *CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE SUSPENDIDO EN EL AIRE EN INMEDIACIONES DE UNA VÍA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO*. . Bogotá.
- Blesa, M. A., Navntoft, C., & Dawidowski, L. (2005). Modelado de la radiación solar UV para aplicaciones en tratamiento de aguas. *SOLARSAFEWATER*, 99-118.
- Board, A. R. (2012). *Paticulate Matter Program*. Recuperado el 22 de 07 de 2012, de Board, Air Resources: <http://www.arb.ca.gov/pm/pm.htm>
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, 207-214.

- Camargo, L. (10 de 09 de 2008). *El Espectador*. Recuperado el 02 de 02 de 2012, de La quema: ¿el lado amargo de la caña?: <http://www.elespectador.com>
- Can, L., N, C., & Si-Chee, T. (2011). A study on the potential applications of satellite data in air quality monitoring and forecasting. *Atmospheric Environment*, 45, 3663e3675.
- Cea, C. J. (2005). Mejoras en la detección semiautomática de nubes y sombras en imágenes Landsat. *XI Congreso Nacional de Teledetección*(11), 21-23.
- Center, N. S. (2003). *MODIS Level 1B Product User's Guide*.
- Chander, G. M. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. . *Remote Sensing of Environment*, 113, 893 - 903.
- Chavez, P. S. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, 1025-1036.
- Cuao, E. A., Álvarez, L., & Vargas, M. (2012). Comportamiento de la Enfermedad Respiratoria de Niños Entre 5 y 14 de la Ciudad de Santa Marta en el Primer Trimestre del 2008 y 2009. *Duazary*, 9(1), 33-41.
- CVC, C. A. (2011). *Informe Anual de Calidad de Aire*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, Cali.
- De la pava, B., & Fernández, O. (2008). Modelación matemática de la relación partículas pm10- enfermedades pulmonares en la ciudad de Cali. *Scientia et Technica Año XIV*(38), 347- 352.
- Donkelaar, A. v. (2011). Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: A case of the Moscow fires in 2010. *Atmospheric Enviroment*, 6225-6232.
- Emili, E., Popp, C., Petitta, M., Riffler, M., Wunderle, S., & Zebisch, M. (2010). PM10 remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote Sensing of Environment.*, 114, 2485-2499.
- Emili, E., Popp, C., Wunderle, S., Zebisch, M., & Petitta, M. (2011). Mapping particulate matter in alpine regions with satellite and ground-based measurements: An exploratory study for data assimilation. *Atmospheric Environment.* , 45, 4344 – 4353.
- EPA. (1990). *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. Recuperado el 25 de Junio de 2013, de <http://www.epa.gov/>

- EPA. (25 de Junio de 2013). *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. Obtenido de <http://www.epa.gov/>
- Espaciales, C.N. (2012). SAC-C. Obtenido de [http://catalogos.conae.gov.ar/sac\\_c/geometria.htm](http://catalogos.conae.gov.ar/sac_c/geometria.htm)
- Esteve, A. R. (2011). ESTUDIO DE LOS AEROSOLLES ATMOSFÉRICOS EN VALENCIA MEDIANTE MEDIDAS DEL NEFELÓMETRO DE INTEGRACIÓN.
- FAO. (2007). *Fire Management - global assessment 2006: A thematic study prepared in the framework of the global resources assessment*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fernández, F., & Ruiz, V. (1998). *Los alcances de la internalización de las externalidades en la solución de la problemática ambiental, en el sector cañero*. Universidad Nacional Sede Palmira: Tesis en Agroecología.
- Fernández, G., & García, M. (2009). Nuevas Técnicas para la Construcción de Índices Ambientales para Grandes Ciudades. *Clim.Economía*(15), 179-210.
- Fernández, G., & García, M. (2009). Nuevas técnicas para la construcción de índices ambientales para grandes ciudades. *Clim. Economía*, 15, 179-210.
- FIUBA. . (s.f.). *Sistemas, Modelos y Simulación* . Buenos Aires: Facultad de Ingeniería de B/A.
- Formenti, P., Andreae, T., Andreae, E., Galani, A., Vasaras, C., Zerefos, V., . . . Lelieveld, J. (2001). Aerosol optical properties and large-scale transport of air masses: observations at a coastal and a semiarid in the eastern Mediterranean during summer. *Journal of Geophysical Research*, 106, 9807-9826.
- Fukushima, H., HIGURASHI, A., MITOMI, Y., NAKAJIMA, T., NOGUCHI, T., TANAKA, T., & TORATANI, M. (1998). Correction of Atmospheric Effect on ADEOS/OCTS Ocean Color Data: Algorithm Description and Evaluation of Its Performance. *Journal of Oceanography*, 54, 417-430.
- García, L. Q. (2010). Optical properties of aerosols: southern México City. *Atmósfera*, 23(4), 403-408.
- García-Mora, T. J., & Mas, J.-F. (2011). Presentación del sensor Modis. En J.-F. Mas, *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* (págs. 11-24).
- Im, J., Saxena, V., & Wenny, B. (2001). An assessment of hygroscopic growth factors for aerosols in the surface boundary layer for computing direct radiative forcing. *Journal of Geophysics Research*, 106, 20213-20224.

- Institute, S. M. (24 de Agosto de 2010). *SMHI*. Recuperado el 15 de Agosto de 2013, de <http://www.smhi.se/en>
- Kaskaoutis, D. K. (2008). Study on an intense dust storm over Greece. *Atmospheric Environment*, 42, 6884–6896.
- Kaufman, Y. (1989). The atmosphere effect on remote sensing and its correction. En Y. Kaufman, *Optical Remote Sensing, Technology and Application*.
- Kaufman, Y. J., & Tanré, D. (1998). *ALGORITHM FOR REMOTE SENSING OF TROPOSPHERIC AEROSOL FROM MODIS*. NASA.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., Gordon, H. R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouins, R., . . . Teillet, P. M. (1997). Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 102(D14), 16,815-16,830.
- Kaufman, Y., & Tanré, D. (1998). Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS. NASA Goddard Space Flight Center. *NASA Goddard Space Flight Center*.
- King, M. D., Kaufman, Y., Tanré, D., & Nakajima, T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from Space: Past, Present and Future. *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, 2229-2259.
- King, M., Kaufman, Y., Menzel, P., & Tanré, D. (1992). Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1), 2-27.
- King, M., Kaufman, Y., Paul Menzel, W., & Tanré, D. (1992). Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 30(1), 2-27.
- Kotchenruther, R., Hobbs, P., & Hegg, D. (1999). Humidification factors for atmospheric aerosols off the mid-Atlantic coast of the United States. . *Journal of Geophysical Research*, 104, Kotchenruther, R. A., Hobbs, P. V., & Hegg, D. A. (1999). Humidification factors for atmospheric aerosols off the mid-At 2239-2251.
- Kumar, N., Chu, N., & Foster, A. (2008). Remote sensing of ambient particles in Delhi and its environs: estimation and validation. *International Journal of Remote Sensing*, 29(12), 3383-3405.

- Larsen, B. (04 de 06 de 2004). *Cost of Environmental Damage: A Socio-Economic and Environmental Health Risk Assessment*. Recuperado el 13 de 09 de 2013, de Ministry of Environment, Housing and Land Development: [www.minambiente.gov.co/.../1745\\_anexo\\_2\\_evaluacion\\_economica.pdf](http://www.minambiente.gov.co/.../1745_anexo_2_evaluacion_economica.pdf)
- Lazcano, M., & Yagüe, C. (2006). *Estudio de las Alturas Características de la Capa Límite Atmosférica en Situaciones Estables a partir de Sondeos con Globo Cautivo y de Observaciones Micrometeorológicas en Torre*. Sevilla: 5 Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica.
- Levy, R., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E. F., & Kaufman, Y. J. (2007). Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-21.
- Levy, R., Remer, L., Tanré, D., Mattoo, S., & Kaufman, Y. (2009). *Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol Over Dark Targets From MODIS*.
- Li, C., Hsu, N., & Tsay, S. (2011). A study on the potential applications of satellite data in air quality monitoring and forecasting. *Atmospheric Environment*, 45, 3663-3675.
- Li, C., Mao, J., & Lau, A. (2005). Application of MODIS aerosol product in the study of air pollution in Beijing. *Science in China -Series, D Earth Science*, 35, 177-186.
- Liang, S., Fang, H., & Chen, M. (2001). Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery—Part I: Methods. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 39(11), 2490-2498.
- López, C. R. (2007). *Determinación de la superficie nival del pirineo catalán mediante imágenes landsat y MODIS*. Séptima Semana Geomática.
- Martínez, J. (2005). *Percepción Remota "Fundamentos de la Teledetección espacial"*. Comisión Nacional del Agua .
- MAVDT. (2010). Territorial, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo. *Resolución 610*.
- McCarty, J. (2011). Estimaciones basadas en sensores remotos de las emisiones anuales y de temporada de la quema de residuos de cosecha en los Estados Unidos contiguos. *Journal Air & Waste Manage*, 61, 22-34.
- Michalski, S. (2009). *HUMEDAD RELATIVA INCORRECTA*. ICCROM.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Dirección de Investigaciones y Extensión Agrícola. (1991). *Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco cultivos agrícolas de Costa Rica*. San Juan.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. . (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*. Bogotá.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía Ambiental para el Subsector de Caña de Azúcar*. Bogotá.
- Muñoz, J. M. (2005). *Percepción Remota "Fundamentos de Teledetección Espacial"*. Comisión Nacional de Agua.
- Naturland. (2000). *Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico*. (As) Recuperado el 02 de 11 de 2013, de Naturland: [http://www.naturland.de/fileadmin/MDB/documents/Publication/Espanol/cayu\\_2005.pdf](http://www.naturland.de/fileadmin/MDB/documents/Publication/Espanol/cayu_2005.pdf)
- NBC. (08 de Noviembre de 2005). *World Enviroment NBCNEWS*. Recuperado el 13 de Febrero de 2013, de [www.nbcnews.com/id/8908221/#.UheE6JKGEK0](http://www.nbcnews.com/id/8908221/#.UheE6JKGEK0)
- Nishihama, M. (1997). *MODIS Level 1A Earth Location: Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0*. NASA.
- Núñez, S. (2002). *Altura de la Capa de Mezcla: Caracterización Experimental y Aplicación de un Modelo Meteorológico Para el Estudio de su Evolución Diurna*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- OSSO, C. (2012). *La ruralidad, la fragilidad y el fenómeno de La Niña en Colombia, 1970 - 2011*.
- Othman, N., Jafri, M. Z., & San, L. H. (2010). Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah, Saudi Arabia. . *Canadian Center of Science and Education*, 4(11), 131-142.
- Perrone, M. R. (2006). Particulate Matter Characterization at a Coastal Site in South-Eastern Italy. *Journal of Environmental Monitoring*, 8, 183-190.
- Pleskachevsky, A., Gayer, G., Horstmann, J., & Rosenthal, W. (2005). Sinergy of satellite remote sensing and numerical modeling for monitoring of suspended particulate matter. *Ocean Dynamics*, 55, 2-9.
- PNUMA. (2010). *Perspectivas del medio ambiente: AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- PNUMA-OMS. (1994). *Aseguramiento de la calidad en el monitoreo de la calidad del aire urbano*. GEMS/Air Serie de Manuales de Metodología.

- Ramos, N. (2009). *Rellenado de los gaps provocados por la falla del Scan Line Corrector en las imágenes Landsat 7 ETM+*. La Habana: Facultad de Matemática y Computación de la Universidad de La Habana.
- Remer, L., Kaufman, Y., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, A., Martins, J., . . . Holben, B. (2005). The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. Laboratory for Atmospheres. *NASA Goddard Space Flight Center*, 947-973.
- Rodríguez, N. G. (2009). Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 9.
- Rodríguez, S. Q. (2001). Saharan Dust Contributions to PM<sub>10</sub> and TSP Levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*, 35, 2433-2447.
- Ronderos, C., & Palacios, L. (2010). *Aspectos económicos, sociales y ambientales de la industria de la caña de azúcar en Colombia*. Universidad Sergio Arboleda.
- Sánchez, E., Herrera, C., & Uribe, E. (1994). *Contaminación Atmosférica. En La Contaminación Industrial en Colombia*. Bogotá: DNP.PNUD.
- Sánchez-Ccoyllo, & Andrade, F. (2002). The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in Sao Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 116, 257-263.
- Sayer, A., Poulsen, C., Arnold, C., Campmany, E., Dean, S., Ewen, G., . . . Watts, P. (28 de 04 de 2011). Global retrieval of ATRS cloud parameters and evaluation (GRAPE) dataset assessment. *Atmospheric Chemistry and physics*, 11, 3913-3936.
- Schmitz, R., & Falvey, M. (2007). *Evaluación de los modelos pronostico de PM<sub>10</sub> actualmente en uso en la región metropolitana*. Santiago de Chile: CONAMA RM.
- Schroeder, T. A., Cohen, W., Song, C., Canty, M. J., & Yang, Z. (11 de 03 de 2006). Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103, 16-26.
- SMHI. (09 de 2009). Recuperado el 03 de 01 de 2015, de SMHI-Airviro: [http://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.7366!/Dispersion.pdf](http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.7366!/Dispersion.pdf)
- SMHI. (2010). *SMHI*. Recuperado el 03 de 01 de 2015, de <http://www.smhi.se/en/services/professional-services/environment/airviro-air-quality-management-system-1.12486>
- Song, C.-K., Ho, C.-H., Park, R., Choi, Y.-S., Kim, J., Gong, D.-Y., & Lee, D.-Y. i. (2009). Song, Chang-Keun; Ho, Chang-Hoy; PSpatial and Seasonal Variations of Surface



- PM10 Concentration and MODIS Aerosol Optical Depth over China. . *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45(1), 33-43.
- Tanabu, Y., Sasaki, T., Takasugi, T., & Fujita, S. (2009). Detection of Sulfur-Containing Gases by MODIS. *International Joint Conference*, 5435-5438.
- Uninal. (19 de Agosto de 2011). *Agencia de Noticias de la Universidad Nacional*. Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de [www.agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/en-un-primera-estacion-de-la-nasa-para-medicion-atmosferica.html](http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/en-un-primera-estacion-de-la-nasa-para-medicion-atmosferica.html)
- Van Rossum, G. (2009). *Tutorial de Python*. Ministry of Environment, Housing and Land Development. Buenos Aires: Python Software Foundation. Recuperado el 09 de 17 de 2013, de <https://docs.python.org>
- Velasco, E. P. (2005). Measurements of CO2 fluxes from the Mexico City urban landscape. *Atmospheric Environment*, 39, 7433–7446.
- Wang, J., Xu, X., Spurr, R., Wang, Y., & Drury, E. (2010(a)). Improved algorithm for MODIS satellite retrievals of aerosol optical thickness over land in dusty atmosphere: Implications for air quality monitoring in China. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2575-2583.
- Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y., & Su, L. (2010(b)). Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. *Remote Sensing of Environment.*, 114, 50-63.
- Watson, J., & Chow, J. (2000). *Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research*. Nevada: Desert Research Institute.
- Young, A. (1980). Revised depolarization corrections for atmospheric extinction. *Optical Society of America*, 3427-3428.





## ANEXOS

## Anexo A. Macro en Código fuente Excel “Visual BASIC”

```
Sub unir_columnas()  
  
    'Por.DAM  
  
    ci = Columns("B").Column 'columna inicial a unir  
    cf = Columns("AG").Column 'columna final a unir  
    cd = Columns("A").Column 'columna unión  
  
    f = 1 'fila inicial de datos  
  
    For i = ci To cf  
        uf = Cells(Rows.Count, i).End(xlUp).Row  
        ud = Cells(Rows.Count, cd).End(xlUp).Row + 1  
        Range(Cells(f, i), Cells(uf, i)).Copy Cells(ud, cd)  
    Next  
End Sub
```

## Anexo B. Regresiones Lineales para Coeficientes Empíricos

b1 2011			
Día	Fecha	Ecuación Lineal	R2
2	ene-02	$y = 1166,1x - 27,133$	0,9973
6	ene-06	$y = 1534,9x - 7,0523$	0,9433

<b>11</b>	ene-11	$y = -53,904x - 26,213$	0,9838
<b>15</b>	ene-15	$y = 3288,9x - 0,4296$	0,8636
<b>22</b>	ene-22	$y = -12,211x - 5,9169$	0,9183
<b>27</b>	ene-27	$y = 1258,9x - 27,727$	0,9837
<b>51</b>	feb-19	$y = -23627x - 24,982$	0,9737
<b>56</b>	feb-24	$y = -15,205x - 14,223$	0,9991
<b>59</b>	feb-27	$y = 620,11x - 15,934$	0,9863
<b>63</b>	mar-03	$y = 956,78x - 4,3114$	0,879
<b>70</b>	mar-10	$y = 1301,4x - 1,4285$	0,8877
<b>74</b>	mar-14	$y = 1820,7x - 10,566$	0,8505
<b>86</b>	mar-26	$y = -447,12x - 6,1185$	0,9303
<b>91</b>	mar-31	$y = 2515,7x - 4,8853$	0,9369
<b>104</b>	abr-13	$y = 1429,9x - 10,332$	0,9608
<b>111</b>	abr-20	$y = 3731,7x - 13,001$	0,9999
<b>116</b>	abr-25	$y = 2379,2x - 5,9617$	0,9524
<b>120</b>	abr-29	$y = 1093x - 10,134$	0,9335
<b>122</b>	may-01	$y = -85,639x - 8,6218$	0,9481
<b>130</b>	may-09	$y = 1083,4x - 34,732$	0,9959
<b>140</b>	may-19	$y = -734,58x - 20,63$	0,9562
<b>143</b>	may-22	$y = 804,98x - 5,5042$	0,971
<b>150</b>	may-29	$y = 992,56x - 11,298$	0,9907

<b>b3 2011</b>			
<b>Día</b>	<b>Fecha</b>	<b>Ecuación Lineal</b>	<b>R2</b>
<b>2</b>	ene-02	$y = 615,45x - 22,718$	0,9772
<b>6</b>	ene-06	$y = 1090,3x - 16,722$	0,9759
<b>11</b>	ene-11	$y = -9,4912x - 7,8164$	0,9839
<b>15</b>	ene-15	$y = -1438x - 13,443$	0,9371
<b>22</b>	ene-22	$y = -6,3321x - 19,891$	0,9728
<b>27</b>	ene-27	$y = 684,96x - 25,999$	0,9872
<b>51</b>	feb-19	$y = -11924x - 26,553$	0,9482
<b>56</b>	feb-24	$y = -4,3962x - 9,0962$	0,9938
<b>59</b>	feb-27	$y = 531,64x - 25,497$	0,9894
<b>63</b>	mar-03	$y = 859,25x - 19,643$	0,9598
<b>70</b>	mar-10	$y = 1175,7x - 16,999$	0,9268
<b>74</b>	mar-14	$y = 1841,8x - 41,322$	0,9082
<b>86</b>	mar-26	$y = -284,68x - 19,014$	0,9677
<b>91</b>	mar-31	$y = 2034,1x - 18,973$	0,9065
<b>104</b>	abr-13	$y = 1015,3x - 20,6$	0,9817
<b>111</b>	abr-20	$y = 1287x - 9,0282$	0,9985

<b>116</b>	abr-25	$y = 1846,5x - 17,157$	0,893
<b>120</b>	abr-29	$y = 803,16x - 20,972$	0,9832
<b>122</b>	may-01	$y = -54,441x - 18,902$	0,9005
<b>130</b>	may-09	$y = 208,83x - 10,287$	0,9391
<b>140</b>	may-19	$y = -385,33x - 25,817$	0,994
<b>143</b>	may-22	$y = 503,29x - 9,1334$	0,9683
<b>150</b>	may-29	$y = 498,37x - 11,696$	0,9969

<b>b4 2011</b>			
<b>Día</b>	<b>Fecha</b>	<b>Ecuación Lineal</b>	<b>R2</b>
<b>2</b>	ene-02	$y = 510,41x - 21,098$	0,9582
<b>6</b>	ene-06	$y = 1030,1x - 19,117$	0,9801
<b>11</b>	ene-11	$y = -8,7531x - 6,9575$	0,9767
<b>15</b>	ene-15	$y = 39817x - 17,069$	0,9554
<b>22</b>	ene-22	$y = -1,3884x - 4,3058$	0,9778
<b>27</b>	ene-27	$y = 564,87x - 26,796$	0,9829
<b>51</b>	feb-19	$y = -8321,6x - 20,294$	0,8945
<b>56</b>	feb-24	$y = -4,5757x - 9,6957$	0,9893
<b>59</b>	feb-27	$y = 449,81x - 26,412$	0,9827
<b>63</b>	mar-03	$y = 151,91x - 4,5197$	0,9734
<b>70</b>	mar-10	$y = 1148,9x - 21,174$	0,9464
<b>74</b>	mar-14	$y = 2002,9x - 57,328$	0,9398
<b>86</b>	mar-26	$y = -302,61x - 22,721$	0,9779
<b>91</b>	mar-31	$y = 2111,4x - 22,595$	0,921
<b>104</b>	abr-13	$y = 990,26x - 24,564$	0,9869
<b>111</b>	abr-20	$y = 1184,7x - 8,9802$	0,9969
<b>116</b>	abr-25	$y = 1928,9x - 21,662$	0,904
<b>120</b>	abr-29	$y = 758,53x - 24,331$	0,9883
<b>122</b>	may-01	$y = -66,485x - 25,733$	0,9197
<b>130</b>	may-09	$y = 127,63x - 6,9139$	0,9454
<b>140</b>	may-19	$y = -393,07x - 28,011$	0,9924
<b>143</b>	may-22	$y = 472,43x - 10,81$	0,9719
<b>150</b>	may-29	$y = 428,73x - 11,567$	0,9939

<b>b1 2012</b>			
<b>Día</b>	<b>Fecha</b>	<b>Ecuación Lineal</b>	<b>R2</b>
<b>1</b>	ene-01	$y = -1808,6x - 29,76$	0,9926
<b>7</b>	ene-07	$y = 1443,6x - 10,899$	0,9934

9	ene-09	$y = 2129,4x - 6,6413$	0,9756
16	ene-16	$y = 1593,4x - 3,7751$	0,9378
25	ene-25	$y = 1982x - 2,6422$	0,9497
27	ene-27	$y = 1528,7x - 8,2554$	0,9679
32	feb-01	$y = 799,98x - 9,1231$	0,9802
33	feb-02	$y = -3629,3x - 57,196$	0,9916
45	feb-13	$y = 2668,9x - 8,238$	0,913
46	feb-14	$y = -571,25x - 18,224$	0,9817
48	feb-16	$y = 871,87x - 7,1041$	0,9665
64	mar-04	$y = 5,014x - 0,8767$	0,9018
68	mar-08	$y = 778,2x - 9,9217$	0,9478
71	mar-11	$y = 1651,1x - 12,755$	0,9964
73	mar-13	$y = 1454,7x - 8,5312$	0,9922
75	mar-15	$y = 1142,7x - 10,166$	0,9853
93	abr-02	$y = 950,13x - 16,348$	0,9356
114	abr-23	$y = 817,87x - 0,9737$	0,8371
116	abr-25	$y = 2215,8x - 4,8081$	0,8854
121	abr-30	$y = 1640,8x - 12,661$	0,9985
123	may-02	$y = 1735,9x - 2,2231$	0,8923
139	may-18	$y = 1375,2x - 6,8688$	0,9591
150	may-29	$y = 645,35x - 15,214$	0,9768

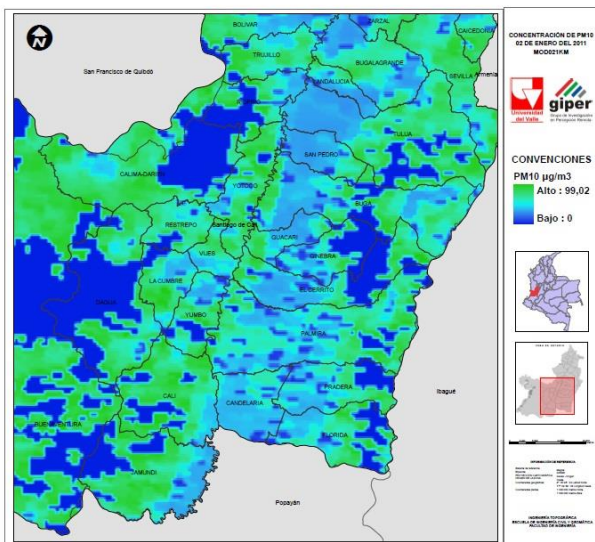
b3 2012			
Día	Fecha	Ecuación Lineal	R2
1	ene-01	$y = -698,11x - 20,684$	0,9691
7	ene-07	$y = 807,94x - 13,471$	0,9868
9	ene-09	$y = 1271,2x - 12,41$	0,951
16	ene-16	$y = 1241,7x - 14,426$	0,9354
25	ene-25	$y = 1154,2x - 6,083$	0,9468
27	ene-27	$y = 895,45x - 12,736$	0,9798
32	feb-01	$y = 553,5x - 15,227$	0,9892
33	feb-02	$y = -1079,7x - 30,568$	0,9548
45	feb-13	$y = 2083,1x - 20,762$	0,9555
46	feb-14	$y = -255,74x - 19,477$	0,944
48	feb-16	$y = 656,69x - 15,74$	0,9774
64	mar-04	$y = -3,0055x - 8,8724$	0,9542
68	mar-08	$y = 637,61x - 19,857$	0,991
71	mar-11	$y = 891,6x - 15,134$	0,9897

<b>73</b>	mar-13	$y = 668,6x - 8,8502$	0,9976
<b>75</b>	mar-15	$y = 706,64x - 14,503$	0,9965
<b>93</b>	abr-02	$y = 771x - 31,603$	0,9874
<b>114</b>	abr-23	$y = 1157,6x - 19,097$	0,8485
<b>116</b>	abr-25	$y = 1804,4x - 20,919$	0,933
<b>121</b>	abr-30	$y = -541,57x - 11,823$	0,9906
<b>123</b>	may-02	$y = 1312,3x - 12,462$	0,9266
<b>139</b>	may-18	$y = -1781,1x - 15,056$	0,9641
<b>150</b>	may-29	$y = 409,37x - 17,435$	0,9931

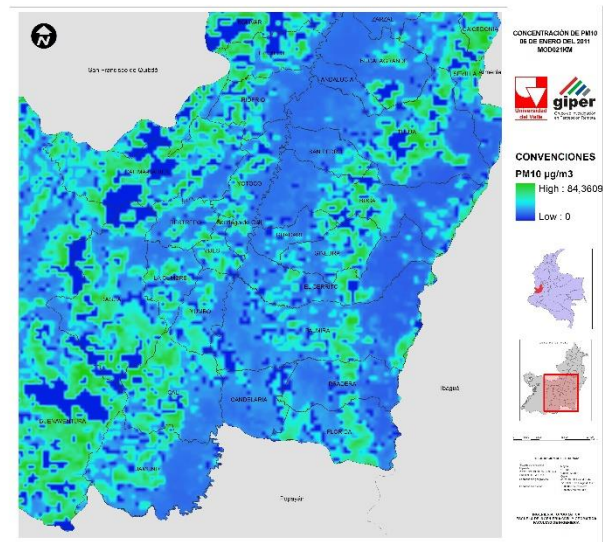
<b>b4 2012</b>			
<b>Día</b>	<b>Fecha</b>	<b>Ecuación Lineal</b>	<b>R2</b>
<b>1</b>	ene-01	$y = -649,51x - 19,602$	0,9502
<b>7</b>	ene-07	$y = 785,45x - 14,258$	0,9866
<b>9</b>	ene-09	$y = 1286,9x - 14,359$	0,9552
<b>16</b>	ene-16	$y = 1239,8x - 16,497$	0,9436
<b>25</b>	ene-25	$y = 1122,1x - 7,0779$	0,947
<b>27</b>	ene-27	$y = 883,32x - 14,384$	0,9837
<b>32</b>	feb-01	$y = 498,83x - 16,152$	0,9919
<b>33</b>	feb-02	$y = -737,91x - 20,381$	0,9605
<b>45</b>	feb-13	$y = 2100,3x - 24,762$	0,9622
<b>46</b>	feb-14	$y = -234,9x - 14,54$	0,9248
<b>48</b>	feb-16	$y = 609,78x - 17,041$	0,9821
<b>64</b>	mar-04	$y = -3,3042x - 9,8601$	0,9626
<b>68</b>	mar-08	$y = 557,23x - 22,151$	0,9924
<b>71</b>	mar-11	$y = 842,76x - 15,586$	0,987
<b>73</b>	mar-13	$y = 619,48x - 9,0952$	0,9959
<b>75</b>	mar-15	$y = 651,24x - 15,526$	0,9961
<b>93</b>	abr-02	$y = 722,34x - 35,322$	0,9848
<b>114</b>	abr-23	$y = 965,24x - 25,183$	0,8638
<b>116</b>	abr-25	$y = 1888,3x - 26,854$	0,9525
<b>121</b>	abr-30	$y = -3561,6x - 12,062$	0,9865
<b>123</b>	may-02	$y = 1343,6x - 15,859$	0,9395
<b>139</b>	may-18	$y = 3969,7x - 18,647$	0,9726
<b>150</b>	may-29	$y = 343,97x - 17,094$	0,9894

**Anexo C.** Cartografías para la cuantificación de PM10, para los promedios de los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo de los años 2011 y 2012.

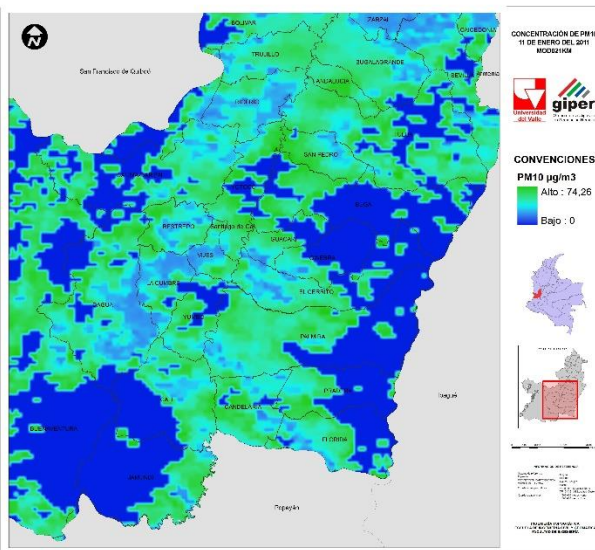
**Enero 02 2011**



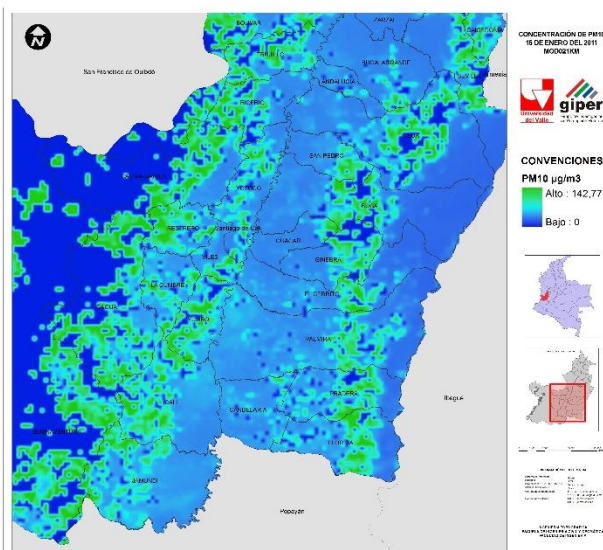
**Enero 06 2011**



**Enero 11 2011**



**Enero 15 2011**



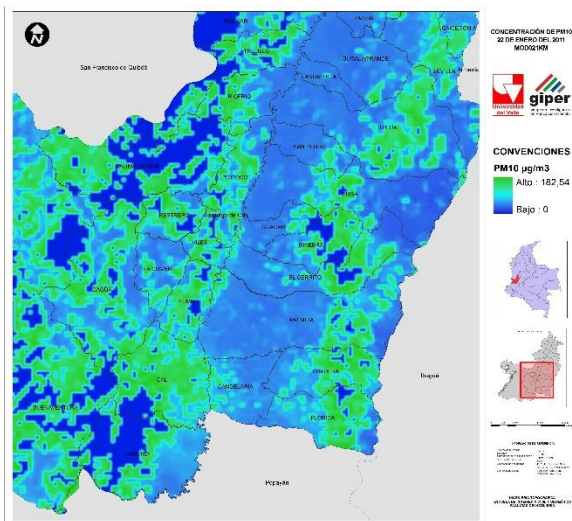
**Enero 22 2011**



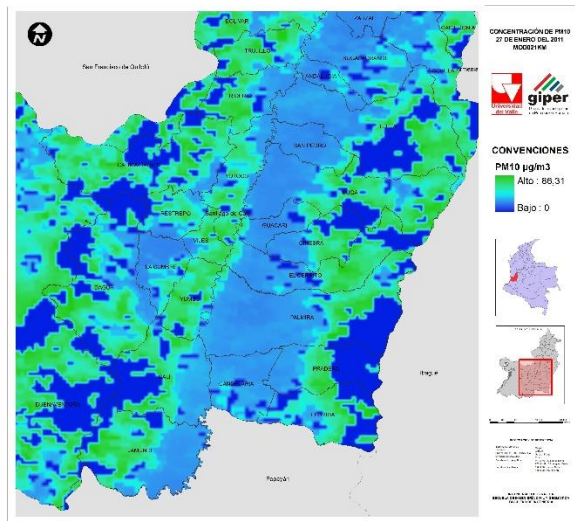
**Enero 27 2011**



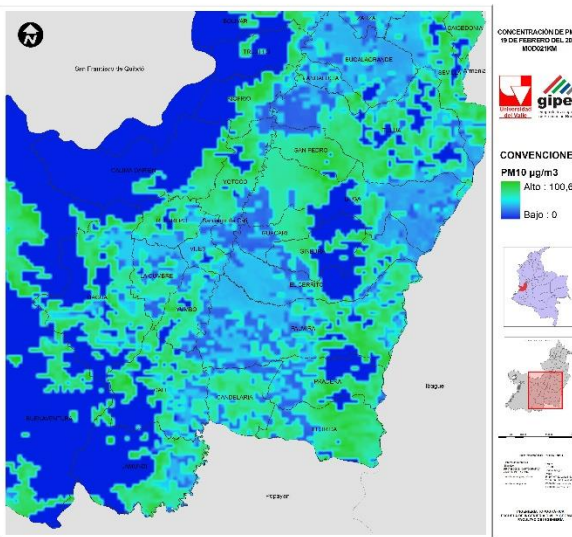




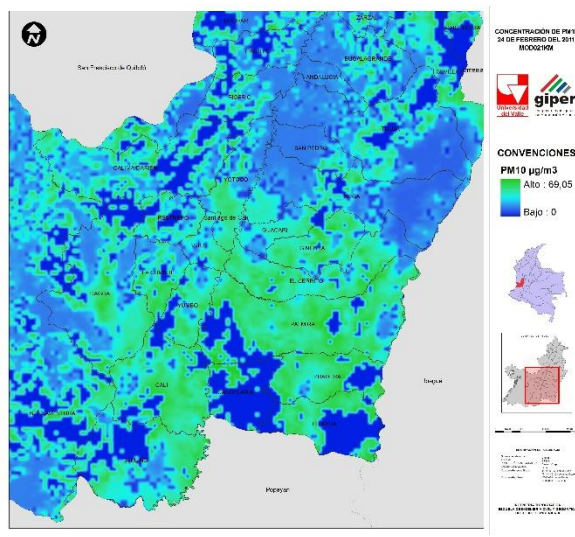
Febrero 20 2011



Febrero 25 2011

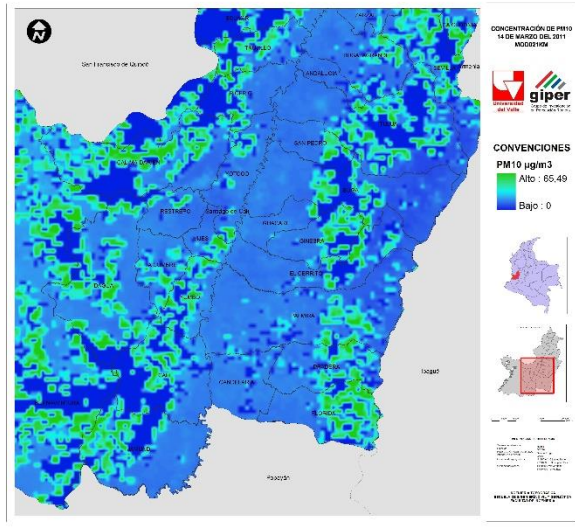
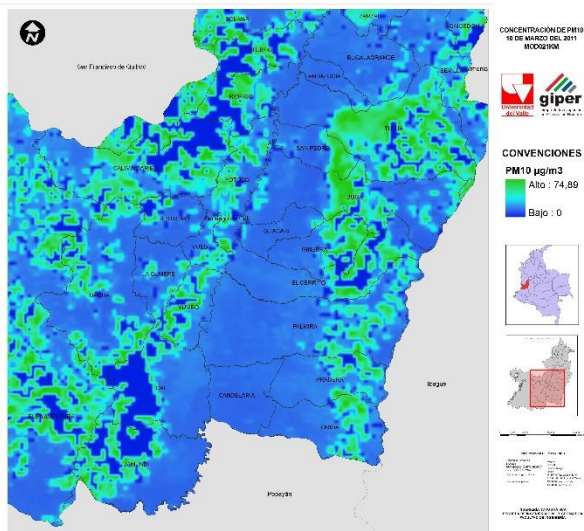


Febrero 28 2011

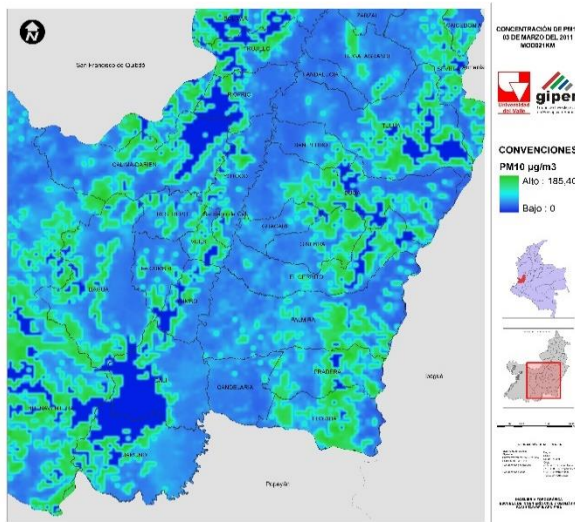
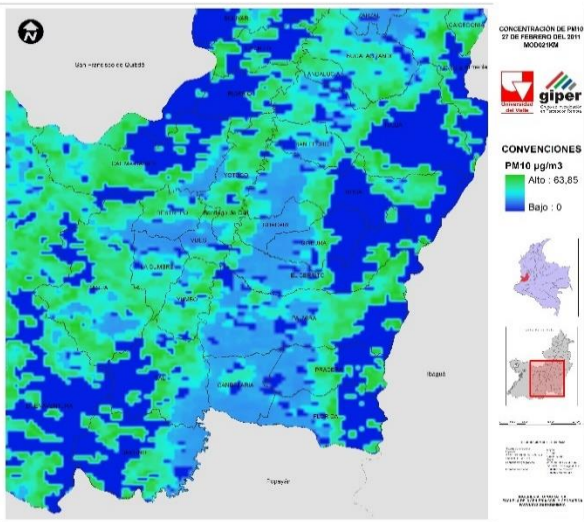


Marzo 04 2011

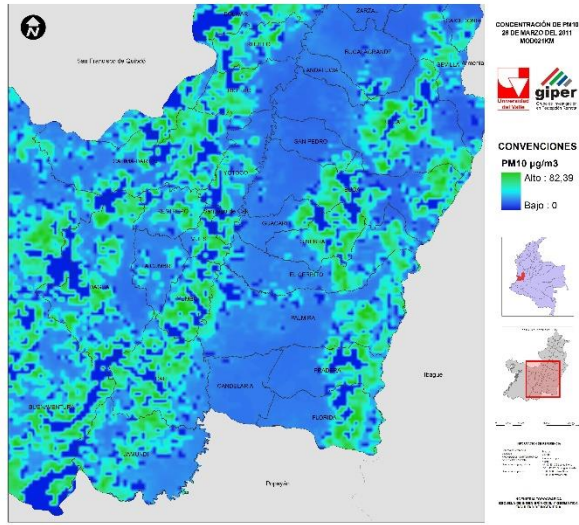




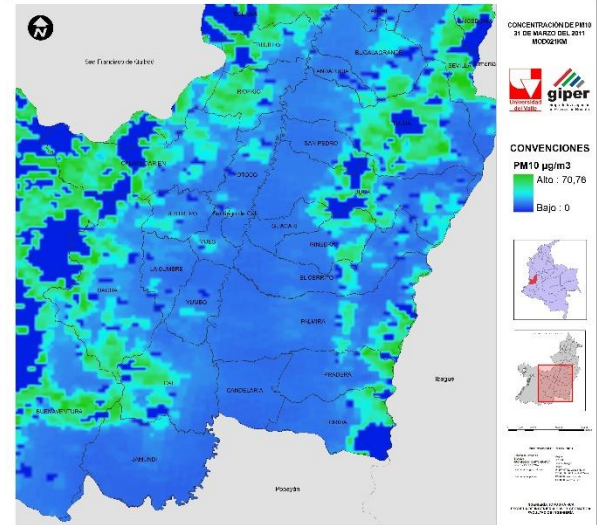
18/03/2011



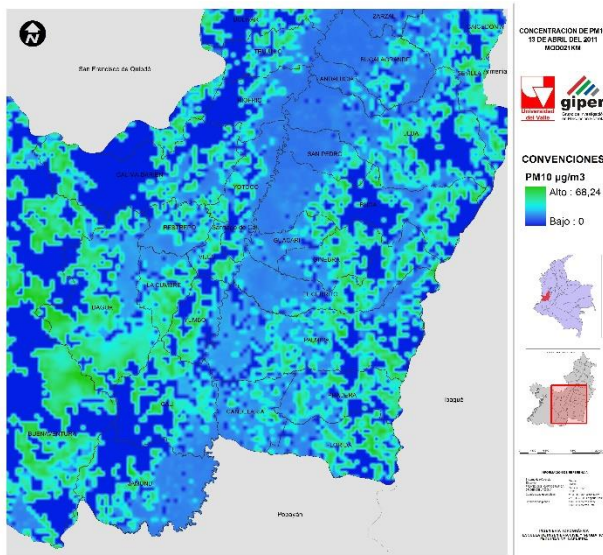
Marzo 27 2011



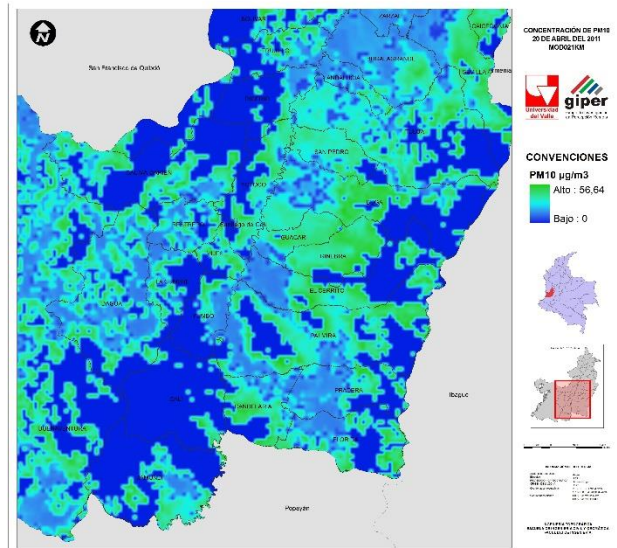
Abril 1 2011



Abril 14 2011



Abril 21 2011



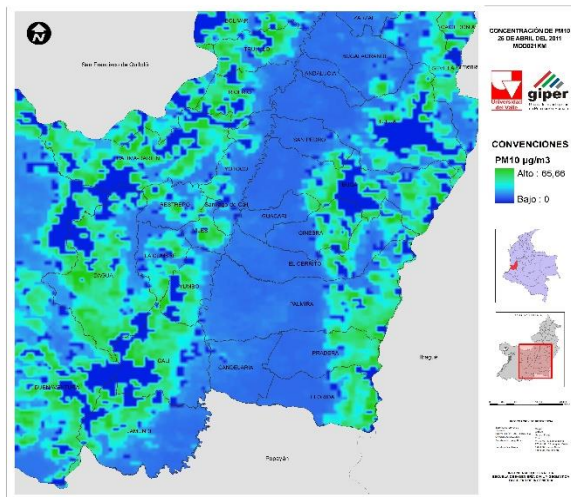
Abril 26 2011



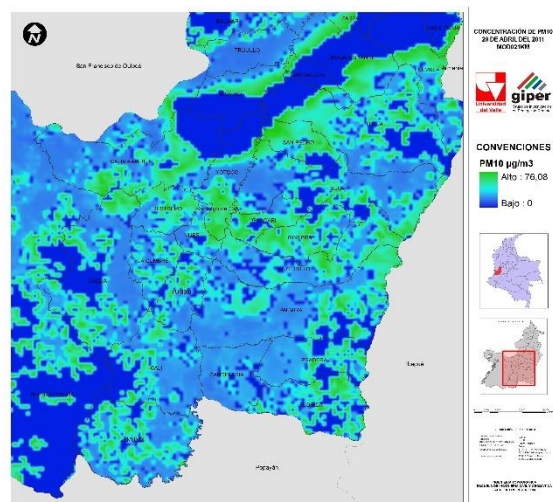
Abril 30 2011



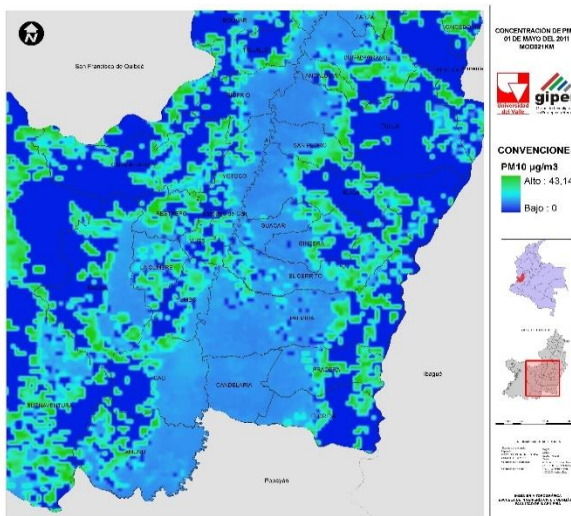




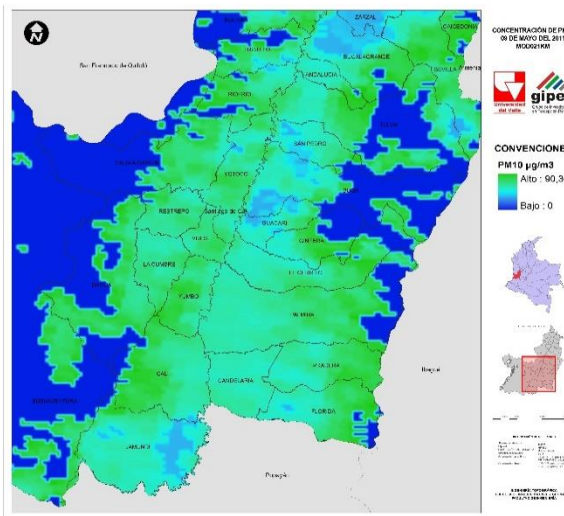
Mayo 02 2011



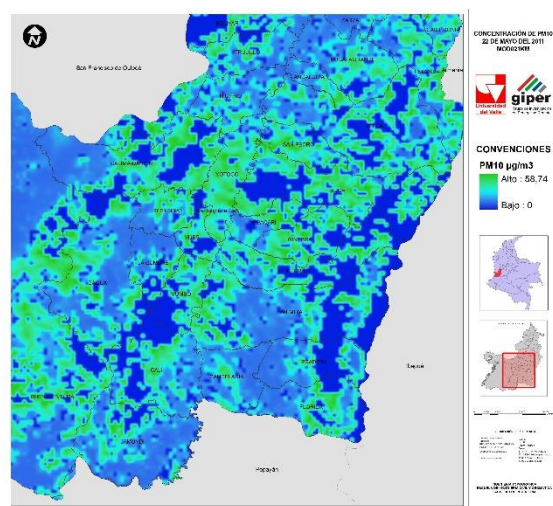
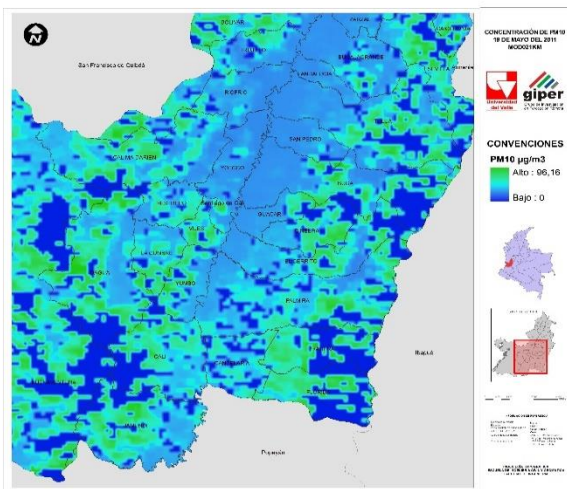
Mayo 10 2011



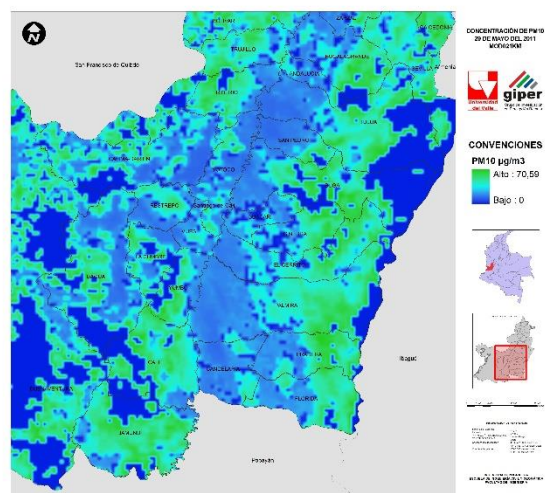
Mayo 20 2011



Mayo 23 2011



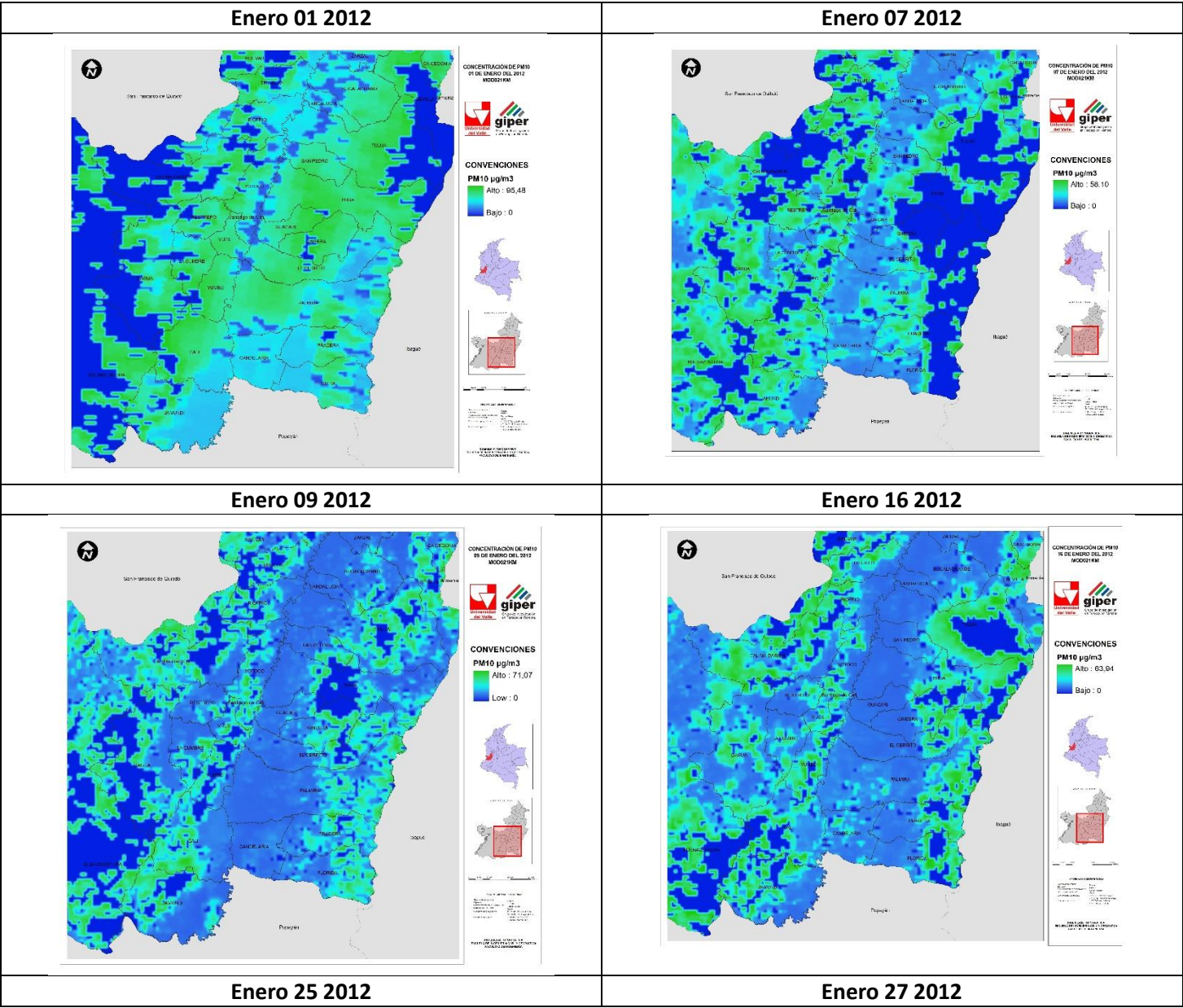
Mayo 30 2011

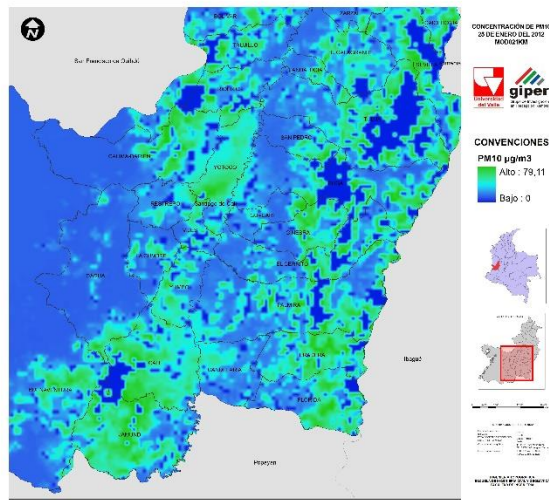


## 2012

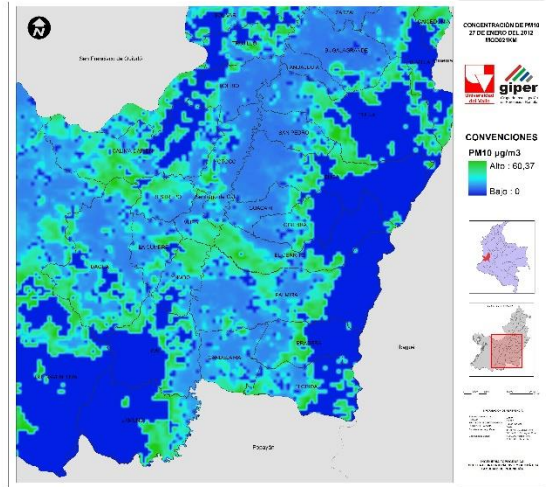
Cartografías para la cuantificación de PM10, para los promedios de los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo del año 2012.



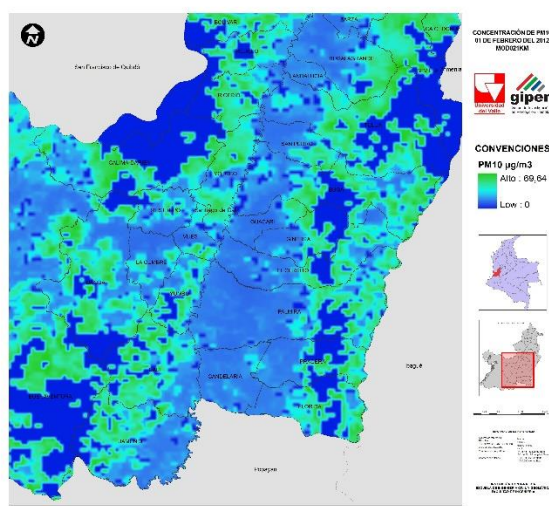




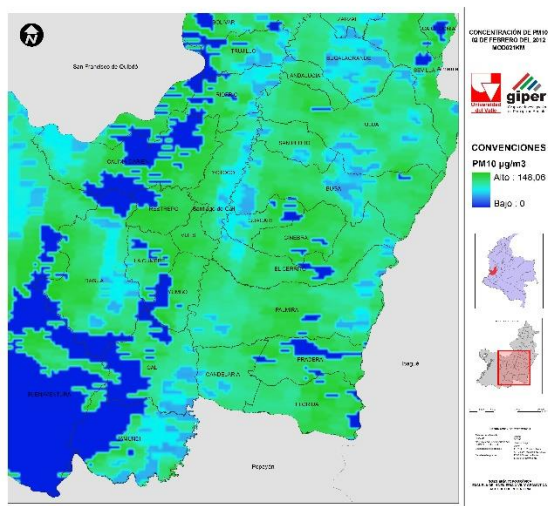
**Febrero 01 2012**



**Febrero 02 2012**



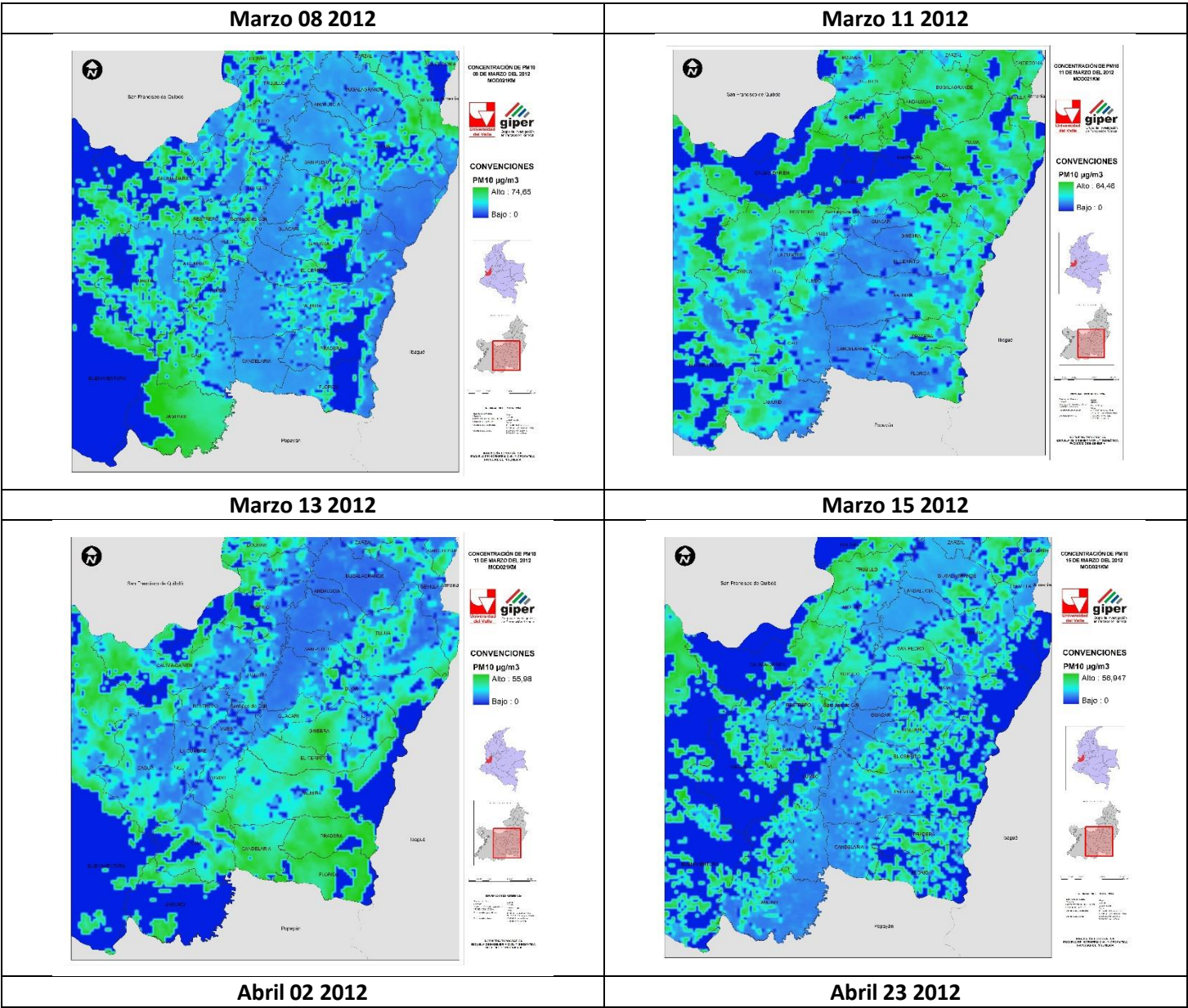
**Febrero 14 2012**



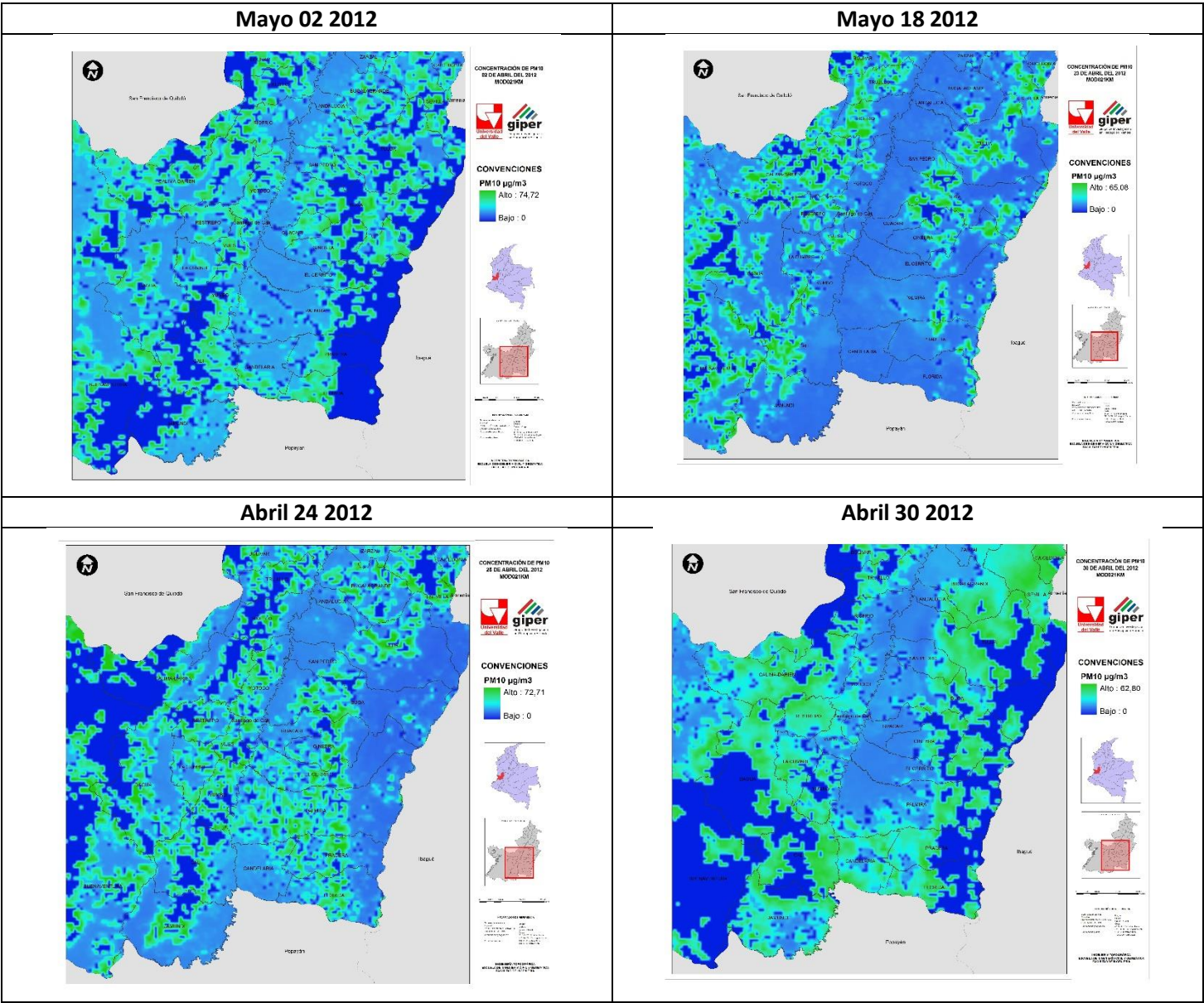
**Febrero 15 2012**



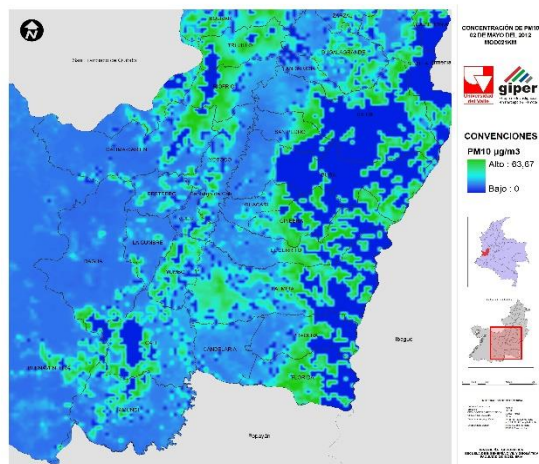




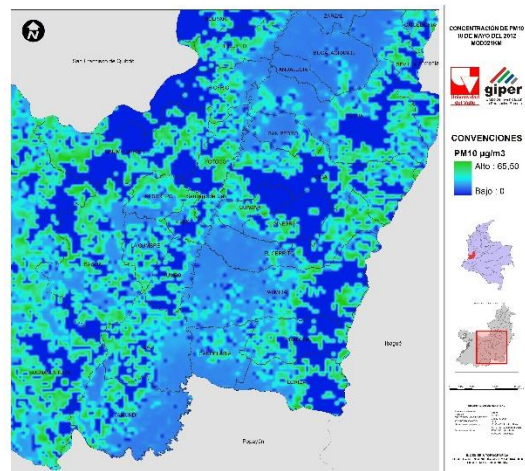




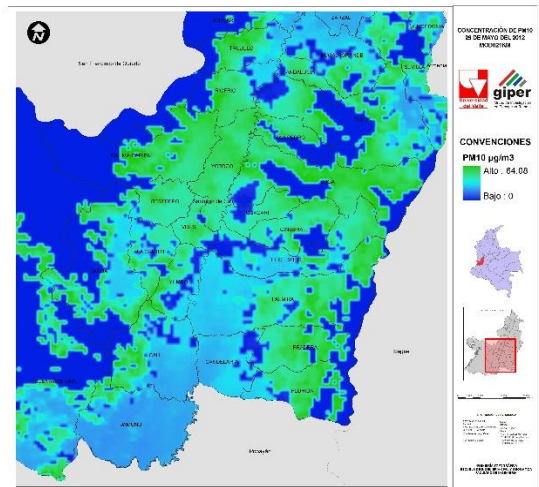
**Mayo 02 2012**



**Mayo 18 2012**



**Mayo 29 2012**



## Anexo D. Cartografías de los modelos dispersión en AIRVIRO

